

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh detektoru magnetického pole

Design of Magnetic Field Detector

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Miroslav Pazdera**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh detektoru magnetického pole**
Design of Magnetic Field Detector

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

K měření magnetického pole je možné využít Hallův jev. Cílem práce je navrhnout a experimentálně prověřit zapojení měřiče magnetické indukce se zobrazením naměřené hodnoty na dvouřádkovém displeji. Základem zapojení je Hallova sonda jako integrovaný obvod.

1. Prostudujte a popište principy měření magnetického pole.
2. Vyberte a navrhnete vhodné zapojení pro detekci magnetického pole v oblasti nízkých kmitočtů případně stejnosměrného pole.
3. Porovnejte vlastnosti navrženého zapojení s komerční sondou magnetického pole měřením v laboratorních podmínkách.
4. Zdůvodněte výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:

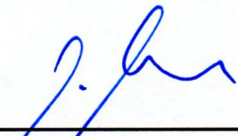
[1] FAJT, V., V. HAASZ a M. SEDLÁČEK. *Elektrická měření*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1992. ISBN 80-01-00751-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Dr. Ing. Libor Gajdošík**

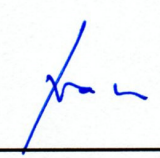
Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019



prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 29. dubna 2019

.....

Rád bych na tomto místě poděkoval mému vedoucímu diplomové práce, panu Dr. Ing. Liboru Gajdošíkovi, za jeho vstřícný přístup, hodnotné rady a odborné vedení mé práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem detektoru magnetického pole s využitím Hallovy sondy. V úvodní teoretické části je rozebráno magnetické pole a jeho vlastnosti. Následně je popsán výběr komponent pro zapojení. V praktické části se práce věnuje vlastnímu návrhu zapojení, řídicímu kódu mikrořadiče a seřízení detektoru na etalonu. Závěr práce je zaměřen na porovnání vlastností navrženého řešení s komerční sondou, včetně vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova: magnetické pole, Hallova sonda, Arduino, ATmega328P, operační zesilovač

Abstract

This thesis deals with a design of a magnetic field detector using a Hall probe. The introductory theoretical part is focused on magnetic field and its properties and is followed by description of used components. The practical part of the thesis describes the design itself, micro-controller code and calibration of the detector. The last part of the thesis compares the designed solution with a commercial alternative.

Key Words: magnetic field, Hall sensor, Arduino, ATmega328P, operational amplifier

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	11
Seznam výpisů zdrojového kódu	13
Úvod	14
1 Magnetické pole	15
1.1 Vznik a zobrazení magnetického pole	15
1.2 Permanentní magnety	15
1.3 Elektromagnety	16
1.4 Magnetické pole Země	17
1.5 Intenzita magnetického pole	18
1.6 Magnetická indukce	18
1.7 Výpočet indukčnosti dlouhé válcové cívky	19
2 Senzory magnetického pole	22
2.1 Hallova sonda	22
2.2 AMR senzor	24
2.3 GMR senzor	26
2.4 TMR senzor	28
2.5 SQUID	30
2.6 Wheatstoneův můstek a jeho využití	30
3 Popis a výběr použitých komponent	32
3.1 Hallova sonda	32
3.2 Operační zesilovače	32
3.3 Obvod elektronických spínačů	40
3.4 TrueRMS - DC konvertor	40
3.5 Konvertor záporného napětí	42
3.6 Mikrořadič	43
3.7 A/D převodník	44
3.8 Displej	44
4 Externí sériové sběrnice	46
4.1 Sběrnice SPI	46
4.2 Sběrnice I ² C	48

5	Obvodové zapojení	52
5.1	Blokové schéma detektoru	52
5.2	Napájecí část	53
5.3	Hallova sonda	53
5.4	Zesilovač s proměnným ziskem	54
5.5	Volič rozsahů a DC filtru	57
5.6	TrueRMS konvertor	57
5.7	Filtr	57
5.8	A/D převodník	57
5.9	Mikrořadič	58
5.10	Klávesnice	58
5.11	Displej	58
5.12	Praktická realizace zapojení	59
6	Software mikrořadiče	60
6.1	Úvodní část programu	60
6.2	Funkce setup	61
6.3	Funkce loop	63
6.4	Funkce getValueADC	63
6.5	Funkce checkButtons	64
6.6	Funkce calculate	65
6.7	Funkce checkRange	66
6.8	Funkce print	67
6.9	Funkce readADC	68
6.10	Funkce setAllRangeZero	69
6.11	Funkce setRange	69
7	Návod k obsluze	71
8	Seřízení a kalibrace na etalonu	73
8.1	Použité přístroje	73
8.2	Návaznost měřidel	74
8.3	Schéma zapojení kalibračního obvodu	74
8.4	Postup seřízení	74
8.5	Postup kalibrace	75
8.6	Záznam o měření	76
8.7	Vyhodnocení výsledků kalibrace	77

9	Porovnání vlastností přístroje s komerční sondou	79
9.1	Popis komerční sondy	79
9.2	Postup měření	79
9.3	Záznam o měření	80
9.4	Vyhodnocení měření	80
9.5	Grafické znázornění linearity	81
	Závěr	83
	Literatura	84
	Přílohy	86
A	Schéma zapojení detektoru	87
B	Graf linearity Hallovy sondy	88
C	Seznam použitých součástek	89

Seznam použitých zkratk a symbolů

AMR	– Anisotropic Magneto-Resistance
CMOS	– Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CMRR	– Common-mode rejection ratio
ČMI	– Český metrologický institut
EEPROM	– Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GMR	– Giant Magneto-Resistance
I ² C	– Inter-Integrated Circuit
LCD	– Liquid Crystal Display
LSB	– Least Significant Bit
MSB	– Most Significant Bit
OZ	– Operační zesilovač
RISC	– Reduced Instruction Set Computer
RMS	– Root Mean Square
SPI	– Serial Peripheral Interface
SRAM	– Static Random Access Memory
SQUID	– Superconducting Quantum Interference Device
TMR	– Tunnel Magneto-Resistance
TTL	– Transistor-Transistor-Logic
USART	– Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	– Universal Serial Bus
F	– Síla
B	– Magnetická indukce
H	– Intenzita magnetického pole
S	– Plocha
I	– Elektrický proud
U	– Elektrické napětí
l	– Délka cívky
r	– Poloměr cívky
d	– Tloušťka destičky Hallovy sondy
U _H	– Hallovo napětí
μ_0	– Permeabilita vakua
π	– Ludolfovo číslo
N	– Počet závitů cívky
Φ	– Hustota magnetického toku
R _H	– Hallova konstanta
R	– Elektrický odpor

A	– Zesílení
θ	– Úhel mezi směrem natočení magnetických domén a proudem
σ	– Směrodatná odchylka
δ	– Relativní odchylka
Δ	– Absolutní odchylka
Z	– Impedance

Seznam obrázků

1	Indukční čáry magnetického pole tyčového magnetu [1]	16
2	Indukční čáry magnetického pole vodiče v řezu kolmém na osu vodiče[1]	16
3	Indukční čáry magnetického pole cívky[1]	17
4	Indukční čáry magnetického pole Země[1]	17
5	Vyznačení úseků uzavřené křivky magnetického pole cívky	20
6	Hallův článek[3]	22
7	Blokové zapojení Hallovy sondy s analogovým výstupem[4]	23
8	Blokové zapojení Hallovy sondy s digitálním výstupem[4]	24
9	Změna úhlu mezi směrem proudu a směrem magnetických domén[3]	25
10	Závislost odporu elementu na intenzitě magnetického pole[3]	25
11	Zapojení senzorů do Wheatstoneova můstku	26
12	Souhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru[3]	27
13	Opačná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru[3]	27
14	Poloviční Wheatstoneův měřící můstek	28
15	Graficky znázorněná funkce spinového tunelování TMR senzoru[8]	29
16	Převodní charakteristika TMR senzoru (vlevo lineárního, vpravo přepínacího) [8]	30
17	Zapojení odporů do Wheatstoneova můstku [10]	31
18	Hallova sonda A1302 od firmy Allegro	32
19	Hallova sonda A1302 (blokové zapojení) [12]	33
20	Operační zesilovač - schématická značka[13]	33
21	Schéma zapojení k určení CMRR u OZ MA1458[17]	35
22	Schéma zapojení invertujícího zesilovače s OZ[16]	36
23	Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače s OZ[15]	37
24	Schéma zapojení rozdílového zesilovače s OZ [13]	37
25	Schéma zapojení sledovače napětí s OZ [15]	38
26	Zapojení vývodů pouzdra OP07CP [18]	39
27	Zapojení vývodů pouzdra LM358 [20]	40
28	Zapojení vývodů pouzdra CMOS 4066 [21]	40
29	Blokové zapojení převodníku AD736 [22]	41
30	Zapojení vývodů pouzdra AD736 [22]	41
31	Funkční schéma nábojové pumpy ICL7660 ve funkci invertoru [23]	42
32	Zapojení vývodů pouzdra ICL7660 [23]	43
33	Zapojení vývodů pouzdra ATmega328P [25]	43
34	Zapojení vývodů pouzdra MCP3202 [26]	44
35	Dvořádkový displej 16x2	45
36	Zadní strana displeje 16x2 s expandérem	45
37	Propojení dvou uzlů sběrnice SPI [30]	47

38	Synchronizace přenášených dat sběrnice SPI [30]	48
39	Propojení více zařízení s ovládáním uzlů pomocí signálu SSEL na sběrnici SPI [30]	49
40	Propojení více zařízení do řetězu na sběrnici SPI [30]	49
41	Propojení zařízení na sběrnici I ² C [32]	50
42	Průběh komunikace sběrnice I ² C při adresování uzlů pomocí sedmibitové adresy. [31]	51
43	Blokové schéma detektoru	52
44	Blokové zapojení zdrojové části	53
45	Zapojení invertujícího zesilovače s posunutou nulou	55
46	Realizace zapojení magnetometru	58
47	Zobrazení údajů na displeji přístroje	71
48	Schéma zapojení pro generování DC magnetického pole	74
49	Fotografie z průběhu seřizování a kalibrace	75
50	Sonda VERNIER MAGNETIC FIELD	79
51	Schéma zapojení detektoru	87
52	Linearita Hallovy sondy	88

Seznam výpisů zdrojového kódu

1	Import knihoven	60
2	Deklarace proměnných	60
3	Nadefinování speciálního znaku pro AC rozsah	61
4	Funkce setup	62
5	Funkce loop	63
6	Funkce getValueADC	63
7	Část funkce checkButtons pro nulovací tlačítko	64
8	Část funkce checkButtons pro tlačítko změny rozsahu	64
9	Část funkce checkButtons pro tlačítko změny jednotek	65
10	Část funkce checkButtons pro tlačítko změnu režimu AC/DC	65
11	Funkce calculate	66
12	Funkce checkRange	66
13	Funkce print	67
14	Funkce readADC	68
15	Funkce setAllRangeZero	69
16	Funkce setRange	70

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem detektoru pro měření intenzity magnetického pole s využitím Hallovy sondy. Naměřené hodnoty mají být zobrazeny na dvouřádkovém displeji.

V první kapitole je popsán vznik magnetického pole a jeho matematické vyjádření. Druhá kapitola rozebírá typy senzorů k měření magnetického pole. Jsou zde představeny jejich technologie, vlastnosti a způsoby jejich využití. Třetí kapitola obsahuje podrobný rozbor jednotlivých komponent použitých v zapojení a obsahuje popis vlastností jednotlivých komponent a důvody jejich výběru do zapojení. Čtvrtá kapitola je věnována popisu sběrnic použitých v zapojení. V páté kapitole se práce zabývá vlastním návrhem zapojení a jeho realizací na prototypovací desce. Šestá kapitola vysvětluje funkci řídicího programu mikrořadiče. Jsou zde popsány jednotlivé proměnné a funkce použité v kódu programu. Sedmá kapitola slouží jako návod na obsluhu zařízení. Osmá kapitola popisuje postup pro seřízení a kalibraci přístroje na etalunu s vyhodnocením výsledků. Poslední kapitola se věnuje porovnání vlastností navrženého zapojení s komerční sondou a následnému vyhodnocení.

1 Magnetické pole

1.1 Vznik a zobrazení magnetického pole

Magnetické pole vzniká kolem pohybujících se elektrických nábojů. U permanentních magnetů je magnetické pole vytvářeno pohybem elektronů kolem jádra atomu. Pokud jsou směry těchto miniaturních (elementárních) magnetů náhodné, magnetická pole jednotlivých atomů se vyruší a materiál nevykazuje magnetické vlastnosti. Pokud jsou všechny uspořádané v jednom směru, navzájem se sčítají a materiál trvale (permanentně) vytváří magnetické pole. V případě elektromagnetů je magnetické pole vybuze volným proudem ve vodiči a skládá se dohromady s polem elementárních magnetů materiálu. Působením vnějšího pole od volného proudu dojde k uspořádání atomárních magnetů materiálu jedním směrem tak, že se výsledné pole posílí. Rozdíl mezi permanentním magnetem a elektromagnetem je ten, že materiál elektromagnetu vytvoří jen pole dočasné (magnetický měkké materiály), materiál permanentního magnetu trvalé (magneticky tvrdé materiály). Po odstranění vnějšího magnetického pole v materiálu zůstane jen tzv. remanentní magnetismus, který je u materiálů permanentních magnetů značný a u materiálů elektromagnetů výrazně slabší.

Magnetické pole se projevuje silovými účinky tak, že magnety přitahují feromagnetické materiály. Síla v magnetickém poli je definována jako:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

kde B je magnetická indukce, I proud vodičem, l je délka aktivní části vodiče a úhel α , který svírá směr vodiče se směrem magnetických indukčních čar. [1]

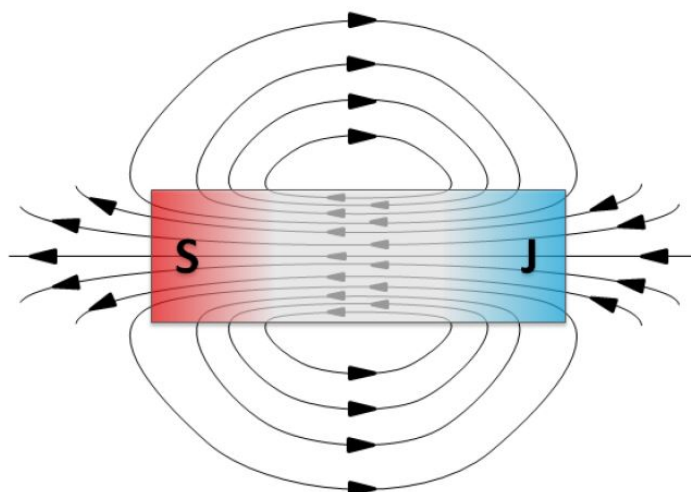
Magnetické pole zobrazujeme pomocí magnetických indukčních čar, viz obrázek.1

1.2 Permanentní magnety

Permanentní magnety mohou mít nejrůznější tvary. Silové účinky se projevují nejvíce na tzv. pólech magnetu označovaných jako severní a jižní (anglicky North a South). Rozpůlením tyčového magnetu vzniknou dva nové magnety s novými póly. Spojením více magnetů vznikne nový magnet se dvěma póly, přičemž silové účinky jednotlivých magnetů se sčítají. Tento jev lze vyjádřit matematicky Maxwellovou rovnicí (Gausova věta pro magnetické pole):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

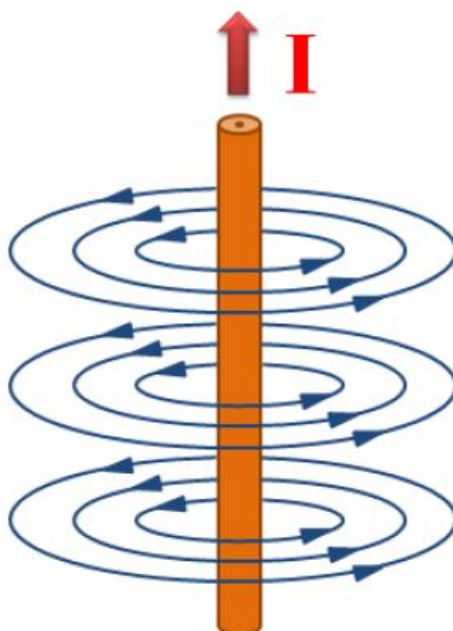
z čehož plyne, že magnetické indukční čáry vždy tvoří uzavřené křivky. Tyto křivky procházejí magnetem a vystupují u severního pólu do prostoru kolem magnetu, aby se do něj vrátily u jeho jižního pólu. Směr indukčních čar vyznačujeme vně magnetu od severního k jižnímu pólu (uvnitř magnetu od jižního k severnímu). Označení pólů magnetů bylo odvozeno od pólů zeměkoule, která má také své magnetické pole.[1]



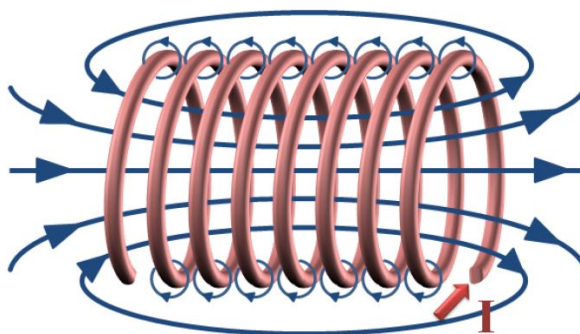
Obrázek 1: Indukční čáry magnetického pole tyčového magnetu [1]

1.3 Elektromagnety

Ve vodiči a v prostoru kolem vodiče protékaného proudem vzniká magnetické pole, jehož magnetické indukční čáry mají tvar soustředných kružnic (válcových ploch), viz obrázek 2. Elektromagnet je tvořen cívkou s určitým počtem závitů, jehož magnetické pole vzniká sčítáním magnetických polí jednotlivých závitů a podobá se magnetickému poli tyčového magnetu, viz obrázek 3.[1]



Obrázek 2: Indukční čáry magnetického pole vodiče v řezu kolmém na osu vodiče[1]

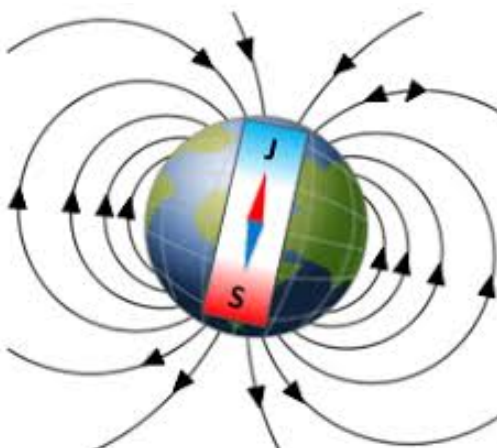


Obrázek 3: Indukční čáry magnetického pole cívky[1]

1.4 Magnetické pole Země

Magnetické pole Země neboli geomagnetické pole, je indukované magnetické pole v okolí Země. V tomto okolí Země působí magnetické síly vytvořené tzv. geodynamem uvnitř Země. Magnetické pole Země dosahuje až do vzdálenosti stotisíc kilometrů od povrchu planety. Magnetické pole kolem Země není symetrické. Jeho tvar je ovlivněn působením kosmického záření od Slunce. Na straně ke Slunci je pole zploštělé a na odvrácené straně naopak protáhlé [3].

Magnetické pole Země vzniká v důsledku rotace elektricky vodivých hmot v jádře planety a následným třením s pevnou částí jádra. Vzniklé magnetické pole můžeme považovat za dipólové a Zemi si můžeme představit jako velký tyčový magnet. Magnetické póly však nesouhlasí s orientací ani polohou zemských pólů. Osa magnetických pólů je odkloněna od osy zemských pólů přibližně o 11° . V blízkosti zemského jižního pólu vystupují indukční čáry ze Země a v blízkosti zemského severního pólu indukční čáry do Země vstupují. Z toho plyne, že v blízkosti zemského severního pólu se nachází jižní magnetický pól a v blízkosti jižního zemského pólu se nachází severní magnetický pól. Označení těchto pólů sever a jih plyne spíše z historických dob a nesouhlasí s fyzikálním faktem, že se opačné magnetické póly vzájemně přitahují [3].



Obrázek 4: Indukční čáry magnetického pole Země[1]

1.5 Intenzita magnetického pole

Jednotkou intenzity magnetického pole je $A \cdot m^{-1}$. Definována je tak, že jejím zdrojem je volný proud a Maxwellův proud. Volný proud si lze představit jako proud tekoucí vodičem a Maxwellův jako proud tekoucí např. mezi deskami kondenzátoru.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad (3)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua a M je vektor magnetizace magnetika (magnetické látky).

Tímto se eliminuje působení vázaných proudů, které je skryto v M a B .

V okolí rovného vodiče, kterým prochází proud I , se tvoří indukční čáry ve tvaru soustředných kružnic (válcových ploch). Ve vzdálenosti r od osy vodiče je intenzita magnetického pole stejná po celé délce indukční čáry [2]. To plyne ze vztahu:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (4)$$

Tento vztah lze odvodit z Maxwellovy rovnice zvané Ampérův zákon celkového proudu, což je zákon popisující vztah magnetického pole k elektrickému proudu, které ho vytváří.

S rostoucí vzdáleností od vodiče se intenzita magnetického pole zmenšuje. Vždy se vztahuje k určitému místu magnetického pole a je na prostředí nezávislá [2].

Při výpočtu intenzity magnetického pole cívky považujeme za délku indukční čáry délku cívky l . Platí:

$$H = \frac{U_m}{l} \quad (5)$$

kde U_m vyjadřuje magnetomotorické napětí cívky, přičemž je dáno, že:

$$U_m = N \cdot I \quad (6)$$

kde N je počet závitů cívky.

1.6 Magnetická indukce

Intenzita magnetického pole je sice nezávislá na prostředí, ve kterém se magnetické pole nachází, ale silové účinky se podle prostředí mění. Vliv prostředí se liší podle typu látky. Některé látky magnetické pole ovlivňují velmi málo, jiné (například železné kovy) ho zesilují tím že se samy zmagnetují. Zesilují pak výsledné pole a zvyšují hustotu siločar [1].

Míru silových účinků magnetického pole v různých prostředích popisuje veličina **Magnetická indukce B** . Jednotkou magnetické indukce je **T** (Tesla). Magnetickou indukci je možné také chápat jako hustotu indukčních čar magnetického pole v ploše kolmé na indukční čáry v daném prostředí [1]. Platí vztah:

$$B = \mu \cdot H \quad (7)$$

kde μ vyjadřuje permeabilitu, kterou můžeme chápat jako měrnou magnetickou vodivost látek (jak snadno magnetické pole prostupuje daným prostředím). Absolutní permeabilita se skládá z permeability vakua μ_0 a relativní permeability prostředí μ_r [1].

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (8)$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (9)$$

Magnetická indukce je **hustota magnetického toku** Φ , přičemž platí:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

1.7 Výpočet indukčnosti dlouhé válcové cívky

Předpokládáme jednovrstvou cívku o rozměru $r \ll l$, aby bylo v dutině cívky možné považovat pole za homogenní (r vyjadřuje poloměr cívky a l její délku). Pole vně cívky považujeme za zanedbatelné vzhledem k poli uvnitř cívky. Cívka je vinuta závitů těsně vedle sebe po celé délce l .

Indukčnost je definována:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (10)$$

kde Φ je magnetický tok vyvolaný proudem I .

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (11)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (12)$$

Platí, že $\vec{B} \perp \vec{S}$, proto můžeme napsat, že:

$$\Phi = B \cdot S \quad (13)$$

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (14)$$

Protože \vec{B} se nachází v lineárním, homogenním a izotropním prostředí, kde $\vec{B} \parallel \vec{H}$, můžeme psát, že:

$$B = \mu \cdot H \quad (15)$$

Plocha jednoho závitů je S . Magnetický tok jednoho závitů je roven $\Phi = B \cdot S$. Celkový tok od N závitů je $\Phi \cdot N$, protože toky jsou souhlasné, viz Ampérovo pravidlo pravé ruky. Dostaneme tedy pro celkový tok cívky vztah:

$$N \cdot \Phi = N \cdot B \cdot S = \mu \cdot H \cdot N \cdot S \quad (16)$$

Pro výpočet intenzity H použijeme Maxwellovu rovnici, viz Ampérův zákon celkového proudu:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_c \quad (17)$$

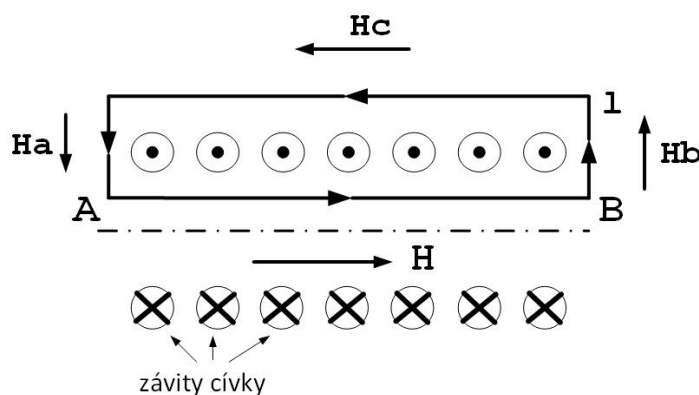
kde I_c je celkový proud, v tomto případě jen volný proud, který teče vodičem, viz definice intenzity magnetického pole v kapitole 1.5. Maxwellův proud zanedbáváme.

Délka l je uzavřená křivka, za kterou zvolíme obdélník, protože podél jeho stran je H uvnitř cívky konstantní (homogenní pole).

Dále platí, že:

$$I_c = N \cdot I \quad (18)$$

kde v každém závitu teče proud I a závitů je N , které křivka l obepíná.



Obrázek 5: Vyznačení úseků uzavřené křivky magnetického pole cívky

Pole H tvoří uzavřené křivky, které jsou označeny jako H , H_A , H_B , H_C , viz obrázek 5. Všude platí, že $H \parallel l$ a znamená, že:

$$\vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot dl \cdot \cos 0 = H \cdot dl \quad (19)$$

Pole $H \gg H_C$ (platí i pro H_A nebo H_B). Budeme tedy uvažovat, že $H_C \doteq H_A \doteq H_B = 0$. Budeme proto počítat jen:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_l H \cdot dl = \int_A^B H \cdot dl = H \cdot l \quad (20)$$

Platí ale, že $H \cdot l = N \cdot I$, proto pro H dostaneme:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (21)$$

Po dosazení dostaneme:

$$N \cdot \Phi = \mu \cdot H \cdot N \cdot S = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l} = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S \cdot I}{l} = \Phi_c \quad (22)$$

kde Φ_c je celkový tok cívky, pro který platí:

$$\Phi_c = N \cdot \Phi \quad (23)$$

Celkovou indukčnost cívky pak řešíme:

$$L = \frac{\Phi_c}{I} = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l} \quad (24)$$

Z tohoto vztahu plyne, že L je úměrná N^2 a μ , což platí pro jakoukoliv cívku.

2 Senzory magnetického pole

K měření magnetického pole existuje několik typů senzorů (snímačů), které si popíšeme v následujících podkapitolách.

2.1 Hallova sonda

2.1.1 Hallův jev

Hallův jev či Hallův efekt, tedy vliv magnetického pole na směr toku elektrického proudu, byl objeven v roce 1879 Edwinem Hallem. Hall během pokusu zjistil, že pokud položí magnet kolmo k ploše tenkého kvádrů zlatu, kterým protéká proud, objeví se na jeho protějších stranách rozdílové napětí a že toto napětí je úměrné hodnotě proudu, hustotě magnetického toku a magnetické indukci[4].

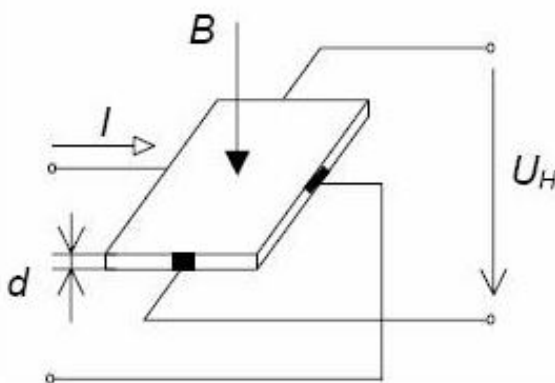
Hallův jev tedy spočívá ve vychylování směru toku elektrického proudu I v závislosti na velikosti indukce magnetického pole B , které je kolmé na směr elektrického proudu procházejícího destičkou (Hallovým elementem) o tloušťce d . To způsobí rozdílné napětí na bočních stranách destičky úměrné právě velikosti působícího magnetického pole B či jeho kolmosti vzhledem k destičce. Tomuto napětí říkáme **Hallovo napětí** a značíme jej U_H . Jeho velikost vypočítáme podle vztahu:

$$U_H = R_H \frac{B \cdot I}{d} \quad (25)$$

kde B je magnetická indukce, I je proud procházející destičkou o tloušťce d a R_H je Hallova konstanta [3].

$$R_H = \frac{1}{q \cdot n} \quad (26)$$

kde q je náboj jednoho nositele náboje a n je koncentrace nositelů náboje v jednotce objemu



Obrázek 6: Hallův článek[3]

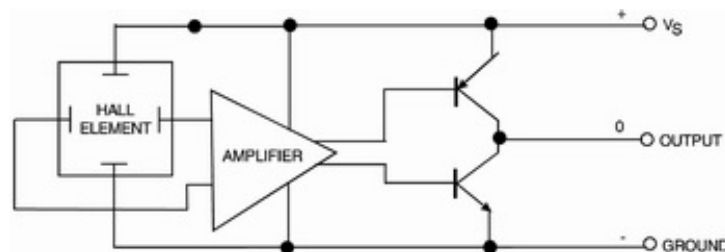
2.1.2 Využití Hallova jevu v praxi

K jeho praktickému využití došlo až po objevení polovodičových materiálů, kdy byl v roce 1965 poprvé vytvořen plně integrovaný křemíkový bezkontaktní spínač s Hallovým jevem. Od té doby vznikly různé typy těchto senzorů v miniaturním provedení, které uvnitř pouzdra obsahují ještě další podpůrné obvody. Vlastní Hallův senzor je vyroben z velmi tenkého plátku polovodiče ve tvaru hranolu o tloušťce asi 0,01mm, který je upevněn na dielektrickou podložku. Rozměry Hallových sond mohou být velmi malé, takže je lze používat pro měření magnetické indukce i v malých vzduchových mezerách feromagnetických obvodů. Sonda měří složku magnetické indukce kolmou k ploše destičky a prakticky neovlivňuje měřené pole, protože neobsahuje žádné feromagnetické části. Napájecí proud se pohybuje v řádu 10 mA až 100 mA. Převodní charakteristika je lineární v měřicím rozsahu od desetin mT až do jednotek T. Nepříznivou vlastností sondy je teplotní závislost Hallova napětí. Pro přesnější měření je potřeba provést teplotní kompenzaci. Pro výrobu Hallových senzorů se používají materiály s vysoce pohyblivými elektrony. Mezi ně se řadí zejména: [5]

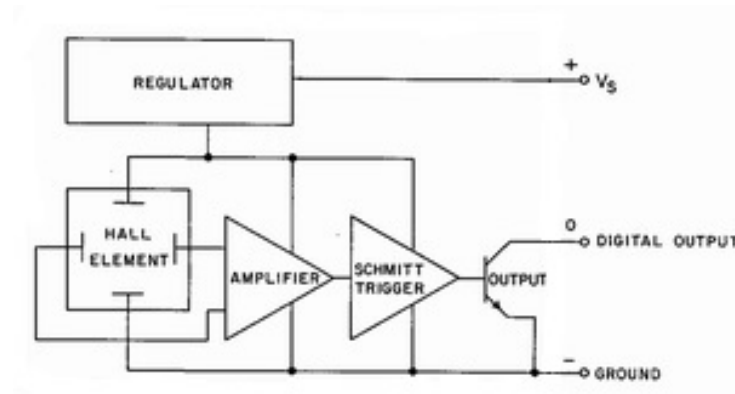
- **GaAs** - Galium arsenid
- **InAs** - Indium arsenid
- **InP** - Fosfid inditý
- **InSb** - Antimonid inditý
- **Grafen** - alotrop uhlíku tvořený šestičlennými cykly uspořádanými do planárních vrstev uhlíku

2.1.3 Typy Hallových sond

Vyskytují se dvě skupiny těchto senzorů (sond), a to buď s analogovým lineárním výstupem (obr.7.), které se hodí např. k měření intenzity magnetického pole nebo k bezkontaktnímu měření proudu, tak i s digitálním dvoustavovým výstupem (obr.8.), jež jsou vhodné například k použití jako detektory polohy, přiblížení, počítání kusů, měření otáček atd.



Obrázek 7: Blokové zapojení Hallové sondy s analogovým výstupem[4]



Obrázek 8: Blokové zapojení Hallové sondy s digitálním výstupem[4]

2.2 AMR senzor

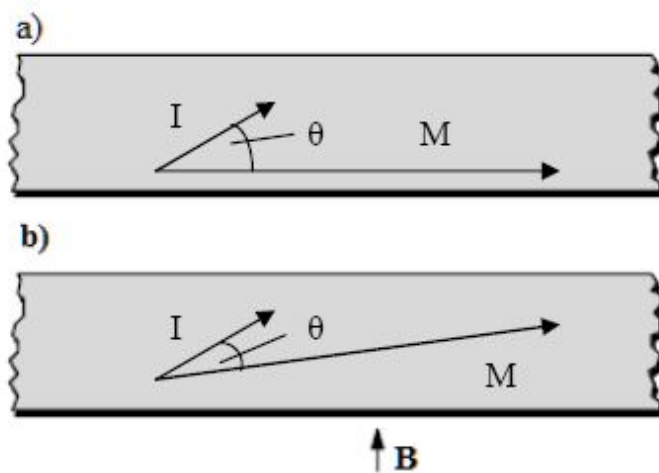
2.2.1 AMR jev

Základem funkce AMR senzoru je tzv. AMR jev. Velmi tenká vrstva slitiny železa a niklu nazývaná permalloy při působení podélného magnetického pole změni svůj elektrický odpor. Změna odporu nastává již při velmi malých hodnotách indukce magnetického pole v řádu jednotek μT až mT . S rostoucí hodnotou pak obvykle odpor rychle a téměř lineárně klesá. Klesne ale pouze o cca 2 až 3% od původní hodnoty odporu materiálu, který nebyl vystaven žádnému magnetickému poli. Pak se již se zvyšující intenzitou magnetického pole odpor dále nemění. Snímací rozsah AMR senzoru je pak vymezen rozměry, tvarem a složením snímacího elementu při výrobě. Mimo samotné intenzity magnetického pole má významný vliv i směr pole vzhledem k orientaci snímacího elementu [6].

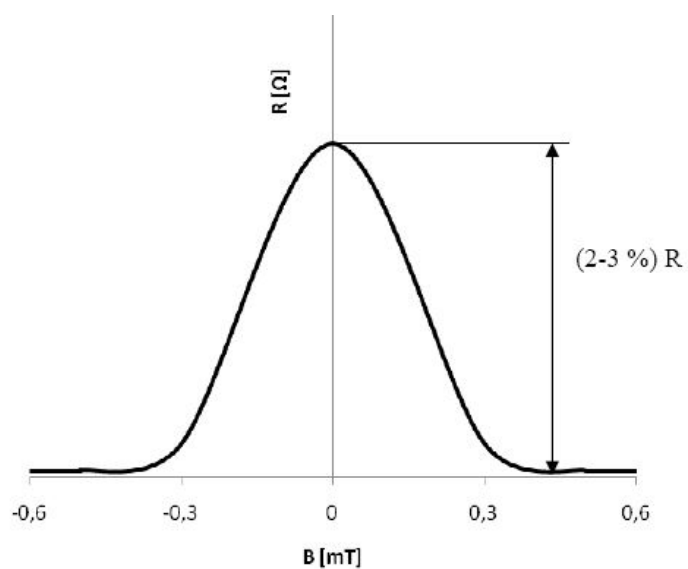
Bez působení magnetického pole jsou magnetické domény orientovány se směrem delší strany AMR senzoru. Této orientace je dosaženo při výrobě působením velmi silného magnetického pole. Takto orientované domény svírají poté s procházejícím proudem \mathbf{I} úhel θ . Má-li permalloy směr magnetických domén \mathbf{M} rovnoběžný se směrem jím procházejícím proudem, je jeho odpor největší. Je-li jejich směr kolmý, pak je odpor nejmenší. Při působení magnetického pole na permalloy dochází k natočení magnetických domén, a tím ke změně úhlu θ mezi směrem natočení domén a směrem procházejícího proudu. To má za následek změnu odporu senzoru. Velikost proudu je úměrná druhé mocnině sinu úhlu mezi vektorem proudu \mathbf{I} a aktuálním vektorem magnetického pole \mathbf{B} . [3][6].

Na rozdíl od Hallova jevu, AMR jev není citlivý na kolmou složku magnetické indukce, ale pouze na podélnou. Nerozlišuje ani její směr, tedy nerozlišuje severní a jižní magnetický pól[6].

Typická charakteristika AMR senzoru je na obrázku 10.



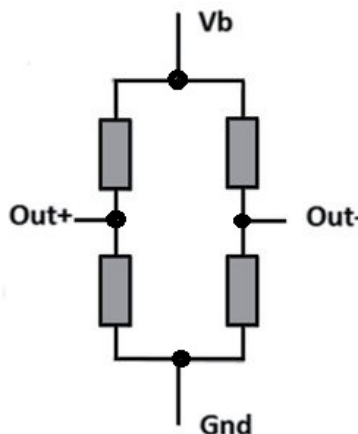
Obrázek 9: Změna úhlu mezi směrem proudu a směrem magnetických domén[3]



Obrázek 10: Závislost odporu elementu na intenzitě magnetického pole[3]

2.2.2 Využití AMR senzorů

V praxi se u těchto senzorů nepoužívá jen jeden permalloy pro detekci magnetického pole, ale využívá se zapojení čtveřice elementů zapojených do Wheatstoneova můstku, viz obrázek 11, o kterém pojednává kapitola 2.6. Mimo jednomůstkového provedení však existují i dvou a třímůstková provedení v jedné součástce například pro realizaci víceosé detekce. U některých typů je ještě přidána cívka pro korekci offsetu a potlačení vlivu teploty. Často se taky využívá tzv. sedvičová konstrukce, která obsahuje další obvody pro napájení permalloy vhodným napětím se zesílením a zpracováním hodnot napětí na výstup tak, aby již nebylo potřeba žádné další vnější elektroniky. Jedná se hlavně o různé spínače a detektory přiblížení. AMR sensory se díky své vysoké citlivosti a výborné linearitě převodní charakteristiky využívají i k přesnému měření např. magnetického pole Země. Navíc jsou tyto senzory i velmi levné na výrobu [4].



Obrázek 11: Zapojení senzorů do Wheatstoneova můstku

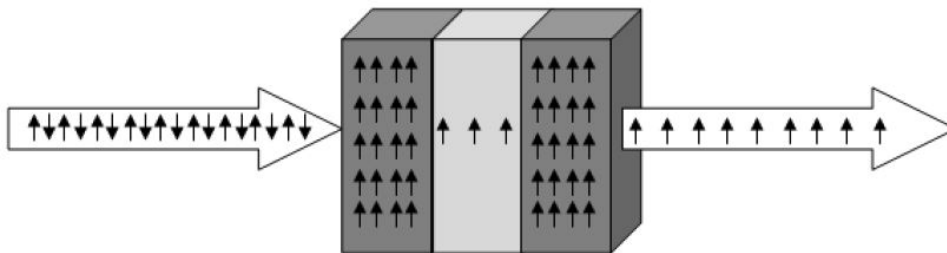
2.3 GMR senzor

GMR efekt je jedním z nejnověji objevených jevů, který se již hojně využívá v podobě integrovaných GMR senzorů magnetického pole. Zde se již pracuje na úrovni nanovrstev a jednotlivých atomů, proto byl jev objeven až v nedávné době. Oproti AMR senzorům se vyznačují výrazně větší citlivostí, konkrétně 10 až 50% z hodnoty odporu při klidovém stavu, kdy na senzor magnetické pole nepůsobí.[7].

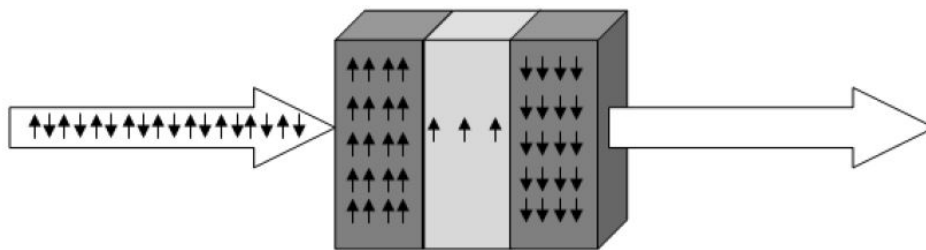
2.3.1 GMR jev

Základní struktura poskytující GMR jev je tvořená z feromagnetických slitin železa, niklu a kobaltu tenkých jen 4-6 nm, které jsou od sebe oddělené měděnou nemagnetickou vodivou střední vrstvou o tloušťce 3-5 nm. Měď je sice za normálních okolností výborný vodič, ale v případě vrstvy tenké jen několik atomů u ní rychle narůstá elektrický odpor. Tento odpor se pak dost výrazně mění v závislosti na tzv. spinu postupujících elektronů. Spin elektronu si můžeme zhruba

názorně představit jako rotaci elektronu ve tvaru kuličky kolem její osy. Rotuje-li elektron po směru hodinových ručiček, má tzv. spin nahoru. Rotuje-li opačně, má tzv. spin dolů. V elektricky vodivých nemagnetických materiálech se pohybuje vyrovnaný počet elektronů se spinem nahoru a dolů. Ve feromagnetických materiálech se můžou volně pohybovat pouze elektrony, jejichž spin souhlasí se směrem magnetizace materiálu viz obrázek 12. Malé šipky vpravo a vlevo ve velkých šipkách vyjadřují spin elektronu v elektrickém proudu, šipky ve feromagnetické vrstvě vyjadřují směr magnetizace. Pokud je magnetizace vzhledem ke spinu elektronů opačná, procházejí elektrony feromagnetickým materiálem velmi obtížně viz obrázek 13.[3][7].



Obrázek 12: Souhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru[3]

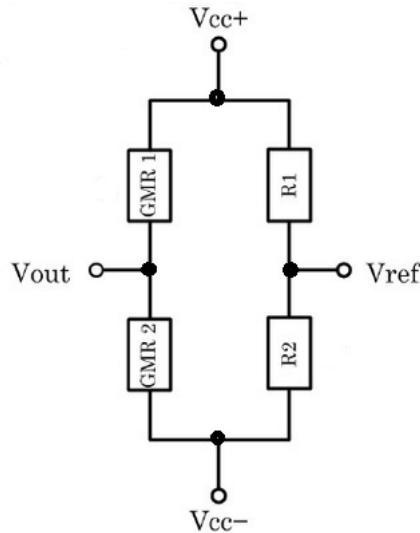


Obrázek 13: Opačná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru[3]

2.3.2 Využití GMR senzorů

U typického GMR senzoru jsou pak odporové elementy zapojeny do Wheatstonova můstku, viz kapitola 2.6. Ve většině případů jsou na čipu doplněny ještě přidruženou elektronikou pro zesílení, linearizaci a vyhodnocení signálu můstku. Výstup senzoru pak bývá buď tranzistorový spínací u detektorů či lineární analogový u měřicích senzorů. Wheatstonův můstek je obvykle tvořen jako poloviční měřicí, kdy dva rezistory jsou měřicí GMR elementy a dva jsou hodnotou pevné referenční rezistory, jak ukazuje obrázek 14. Někdy jsou všechny rezistory realizované jako GMR elementy, přičemž měřicí rezistory jsou obvykle opatřeny koncentrátorem magnetického toku. Tyto k nim přivádí magnetické pole a měří jej a naopak odstiňují zbylé dva referenční rezistory.

GMR senzor má tendenci snadno přecházet do saturace. Jedná se o stav, kdy už nad určitou hodnotou intenzity magnetického pole nedochází ke změně odporu a tedy ani výstupního napětí



Obrázek 14: Poloviční Wheatstoneův měřící můstek

můstku. Proto se výborně hodí do čtecích hlav harddisků, kde nás zajímají pouze dva stavy H a L [7].

2.4 TMR senzor

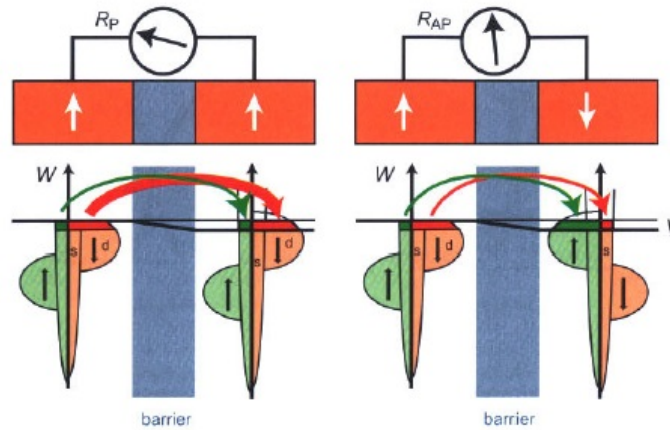
Podobně jako AMR či GMR je i technologie TMR tvořena 3-vrstvou strukturou vykazující změnu elektrického odporu v závislosti na velikosti okolního magnetického pole. Rozdíl oproti AMR a GMR technologiím je v ještě vyšší citlivosti na změnu magnetického pole. Změna odporu oproti klidovému stavu je v rozsahu 30 až 70%,

2.4.1 TMR jev

Pokud budeme vycházet ze senzoru GMR, jeho struktura velmi podobná s tím rozdílem, že v senzoru TMR je prostřední vrstva z nevodivého materiálu oxidu hliníku. Za normálních okolností by měla být tato vrstva nevodivá, ale kvůli velmi tenké vrstvě pouhých několika atomů je za určitých okolností vodivá. Pokud je vrstva dostatečně tenká, elektrony touto vrstvou proletí (protunelují). Zatímco u větších tloušťek izolantu již elektrony mají tolik srážek s atomy materiálu, že neprojdou. Při velmi malé tloušťce se sice zpomalí, ale nakonec ještě projdou.

Zde se již pohybujeme na úrovni kvantové fyziky, kde se jednotlivé možnosti pohybů elektronů vyjadřují tzv. energetickým modelem s ústřední hladinou zvanou Fermiho hladina. Ta odděluje tzv. valenční a vodivostní pás a udává, kolik energie se musí dodat elektronu k přechodu z valenční vrstvy do vodivostní. Elektrony ve vodivostním pásu tvoří onen elektrický proud. Čím je v něm více elektronů, tím je proud větší. Aby proud mohl procházet, musí se dodat energie pro přechod elektronů z valenčního pásu do vodivostního. V případě elektricky vodivých kovů se valenční a vodivostní pásmo dotýká nebo i kříží. Hranicí je právě Fermiho hladina. V případě tenké

vrstvy izolantu se ještě vytváří tzv. zakázaná oblast, kvůli které se musí elektronům dodat větší energie, aby prošly do vodivostní vrstvy. Pokud je vrstva izolantu tenká, a pokud za touto vrstvou je vrstva s dostatečným množstvím volných energetických hladin, kam se mohou elektrony přemístit, mohou elektrony protunelovat přes tuto vrstvu izolantu i s malou dodanou energií, např. teplem. Musí být ale splněna podmínka volných energetických hladin za vrstvou izolantu stejně jako ve vodivostní vrstvě před izolantem. Spin elektronů hraje stejnou roli jako u senzoru GMR. Jsou-li vrstvy okolo izolační vrstvy zmagnetovány souhlasně, tak elektrony, jejichž spin je souhlasný s magnetickým momentem feromagnetických vrstev, mohou tunelovat přes vrstvu izolantu. Strukturou tak bude protékat proud a odpor celé struktury bude malý. Bude-li jedna vrstva zmagnetizována opačně, pak pro elektrony, které jsou v první feromagnetické vrstvě, není za izolantem dostatečný počet energetických hladin, a tak není splněna podmínka pro tunelování a celkový odpor struktury bude velký [3] [8].



Obrázek 15: Graficky znázorněná funkce spinového tunelování TMR senzoru[8]

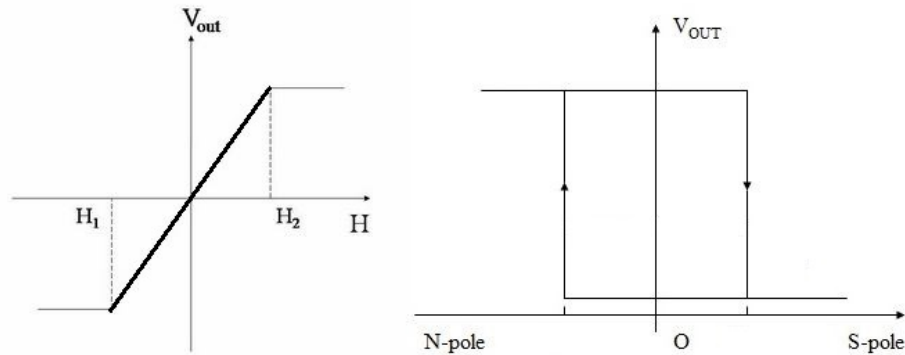
2.4.2 Využití TMR senzorů

Tyto senzory se hodí pro všechna velmi citlivá zařízení, jako jsou velmi citlivé senzory či čtecí hlavy harddisků. Hojně se také vyskytují v elektronických kompasech. Za výhodu lze tedy považovat vysokou citlivost na magnetické pole. Nevýhody spočívají v teplotní závislosti senzoru a nákladné výrobě.

Existují dva typy senzorů. Pokud se jedná o lineární senzor, ten se vyznačuje maximalizovanou lineární částí převodní charakteristiky a naopak minimální hysterezí, viz obrázek 16 vlevo. Přepínací senzor má naopak nastavený přechod mezi dvěma odporovými stavy jako skokový, tedy lineární oblast je minimální a při působení externího magnetického pole dostatečné velikosti dojde k rychlému (téměř skokové) změně odporu elementu, jak ukazuje obrázek 16 vpravo. Tato varianta se využívá i v TMR senzorech, které obsahují vícevrstvou strukturu s několika tunelujícími přechody. Tím se dále zvyšuje citlivost, ale zároveň i přechod z nízkého odporu na

vysoký je ve více krocích, čehož lze využít u záznamových zařízení.

Jednotlivé elementy se opět zapojují do Wheatstoneova můstku, viz obrázek 11. Tento způsob zapojení je popsán v kapitole 2.6.



Obrázek 16: Převodní charakteristika TMR senzoru (vlevo lineárního, vpravo přepínacího) [8]

2.5 SQUID

SQUID je označení pro supravodivé kvantové interferenční zařízení. K funkci tohoto zařízení se využívá tzv. Josephsonova jevu, který je postaven na využití přechodu supravodič-izolant, kde lze díky kvantovému tunelování Copperových párů měřit velmi malé rozdíly napětí.

Tato metoda se využívá k měření velmi slabých magnetických polí v řádech femto Tesla. Uplatnění nachází např. v lékařství k měření mozkových signálů. Nevýhodou je ale vysoká finanční náročnost, protože k funkci je potřeba používat kapalné hélium. Lze využít i levnější dusík, ale za cenu menší přesnosti [9].

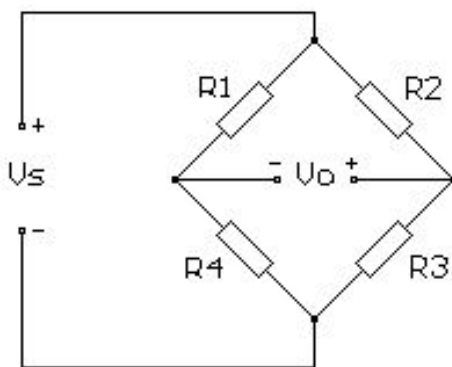
2.6 Wheatstoneův můstek a jeho využití

V praxi se často vyžaduje měřit malé rozdíly hodnot např. odporů, které mají velkou základní hodnotu. Tyto malé změny se ale měří velmi špatně. Pokud máme např. dva rezistory o velikosti $1\text{ M}\Omega$ a potřebujeme mezi nimi zjistit rozdíl $1\text{ k}\Omega$, s ohmetrem s přesností 1% tento rozdíl nelze změřit, jelikož chyba přístroje je $10\text{ k}\Omega$ a nelze brát vážně zjištěný rozdíl $1\text{ k}\Omega$. Z tohoto důvodu se používá Wheatstoneovo můstkové zapojení, viz obrázek 17. Pomocí něho se dá měřit změna odporu jako velikost jeho výstupního napětí. Můstek se skládá ze dvou napěťových děličů R_1 , R_4 a R_2 , R_3 zapojených paralelně, kde je výstupní napětí U_0 tvořeno rozdílem výstupních napětí jednotlivých děličů (větví můstku), nezávisle na jejich absolutní hodnotě. Souhlasná změna napětí v obou větvích můstku se na jeho výstupním napětí neprojeví (nedojde k rozvážení můstku). Pouze nesouhlasná velikost napětí v jednotlivých větvích dá na výstupu můstku napětí o velikosti jejich rozdílu. Pokud bude napětí v obou větvích stejné a platí podmínka, že $R_2 \cdot R_4 = R_1 \cdot R_3$, tak můstek bude tzv. vyvážený a na jeho výstupu bude nulové napětí. Změna

kteréhokoliv odporu nyní způsobí rozvážení můstku a napětí na výstupu úměrné této změně. Nejvyšší citlivosti můstku dosáhneme, pokud platí, že $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. [10]

Wheatstoneův můstek lze také využít k teplotní kompenzaci měření, jelikož se změnou teploty dojde ke změnám odporů v obou větvích o stejný rozdíl. Tím pádem nebude mít změna teploty vliv na výstupní napětí můstku, protože nedojde k jeho rozvážení. Wheatstoneův můstek se dá využít i k potlačení různých rušivých vlivů, které by jinak znemožnily měření.

V praxi se používají celkem tři různá zapojení a to čtvrtmůstek, půlmůstek a plné zapojení do můstku. Způsob zapojení závisí na počtu aktivních členů, které chceme v můstku mít.



Obrázek 17: Zapojení odporů do Wheatstoneova můstku [10]

Při řešení můstku vycházíme z řešení klasického děliče napětí, kde pomocí Kirchhoffových zákonů můžeme dělič řešit takto: [11]

$$\frac{U_{O-}}{U_S} = \frac{R_4}{R_1 + R_4} \quad \frac{U_{O+}}{U_S} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (27)$$

Výstupní napětí můstku lze tedy spočítat: [11]

$$U_{O-} = \frac{R_4}{R_1 + R_4} \cdot U_S \quad U_{O+} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_S \quad (28)$$

K vyhodnocení naměřených hodnot lze využít např. zapojení diferenčního zesilovače s OZ, kde na jeden vstup připojíme U_{O+} a na druhý U_{O-} .

3 Popis a výběr použitých komponent

Jak je již uvedeno v zadání, detektor má měřit ve 3 rozsazích 1 mT, 10 mT a 100 mT jak stejnosměrné, tak i střídavé magnetické pole. Jako výstupní zobrazovač má být použit dvouřádkový maticový LCD displej. V této kapitole si postupně rozebereme jednotlivé komponenty použité v zapojení. Vzhledem k tomu, že zapojení bude realizováno na prototypovací desce, nebude při volbě součástek uvažováno s pouzdry typu SMD. Integrované obvody se budou tedy volit v provedení pouzdra DIP.

3.1 Hallova sonda

V kapitole č.2 jsme si podrobně rozebrali různé typy magnetických senzorů. Kvůli většímu měřicímu rozsahu, nízké teplotní závislosti a dobré linearitě byla zvolena Hallova sonda s lineárním výstupem, která potřebné aplikaci vyhovuje nejlépe. Pro zapojení nakonec byla vybrána Hallova sonda A1302 od firmy Allegro, viz obrázek 18, která je snadno dostupná např. v prodejně síti GM Electronic. Blokové zapojení sondy je na obrázku 19. Podle katalogových hodnot výrobce



Obrázek 18: Hallova sonda A1302 od firmy Allegro

bude použito napájecí napětí sondy 5 V. Citlivost sondy se při tomto napájení uvádí 1,3 mV/G. Pokud není senzor umístěn v magnetickém poli ($B = 0$), je na výstupu sondy napětí 2,5 V. Při vložení sondy do magnetického pole se napětí buď snižuje, nebo zvyšuje podle směru indukčních čar magnetického pole v závislosti na jeho intenzitě, čímž se dá změřit jeho intenzita a orientace.

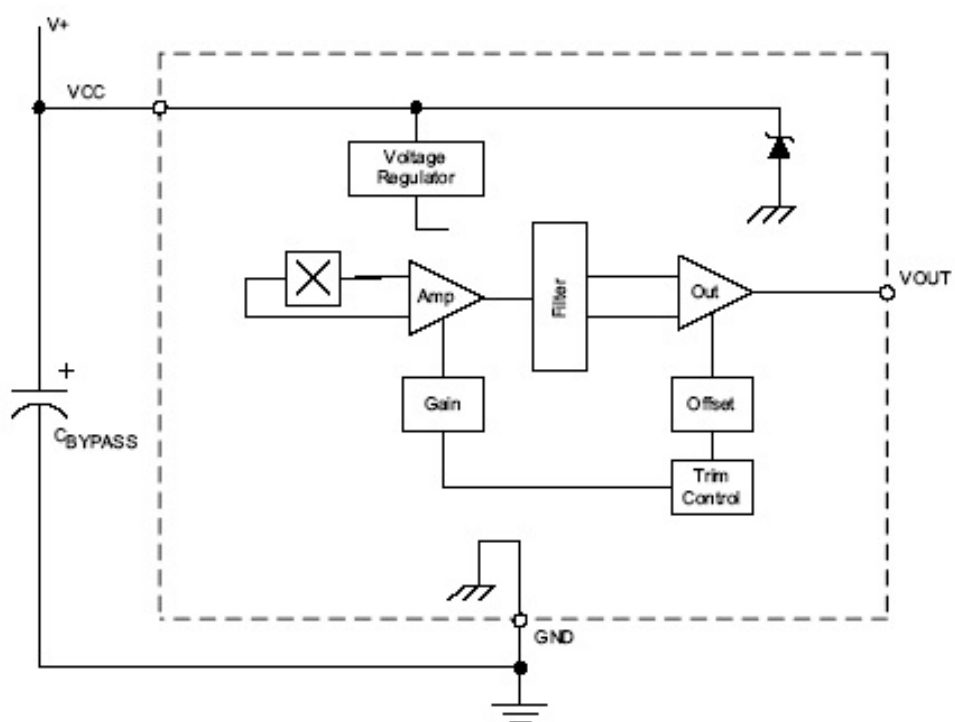
3.2 Operační zesilovač

Aby bylo možné se signálem z Hallové sondy pracovat, je potřeba zařadit do obvodu zesilovač s proměnným zesílením (kvůli přepínání rozsahů). K tomuto se nejlépe hodí operační zesilovač (OZ). Operační zesilovač je elektronická součástka (integrovaný obvod), která se vyznačuje velkým zesílením rozdílového napětí. Může zesilovat jak stejnosměrné signály, tak i střídavé.

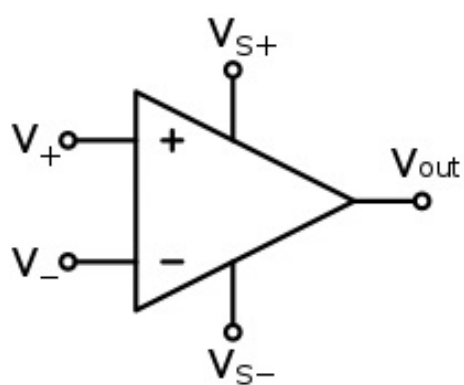
Operační zesilovač má dva vstupy pojmenované jako invertující(-) a neinvertující(+). Dále má pak napájecí vývody, vývody pro potlačení nesymetrie, kmitočtovou kompenzaci atd.

Pokud přivádíme signál na invertující vstup, dojde kromě zesílení i k posunutí fáze signálu na výstupu o 180° . Jestliže přivádíme signál na neinvertující vstup, dojde k zesílení, ale k fázovému posuvu nedochází.

Schématická značka operačního zesilovače je na obrázku [13].



Obrázek 19: Hallova sonda A1302 (blokové zapojení) [12]



Obrázek 20: Operační zesilovač - schématická značka[13]

3.2.1 Parametry operačních zesilovačů

- **napěťové zesílení** A_u - u ideálního OZ nekonečně velké, u reálného je velikost výstupního napětí limitována napájecím napětím
- **frekvenční rozsah** - u střídavého signálu se se zvyšující frekvencí snižuje zesílení, což lze ale vyřešit frekvenční kompenzací
- **vstupní impedance** Z_{in} - u ideálního OZ nekonečně velká, u reálného má být co největší, aby zbytečně nezatěžovala připojené obvody
- **výstupní impedance** Z_{out} - u ideálního OZ nulová, u reálného má být co nejmenší, aby připojené obvody neovlivňovali zesílení
- **drift a offset** - u ideálního OZ musí nulovému vstupnímu napětí odpovídat nulové výstupní napětí, u reálného OZ může být kompenzováno pomocí přídavných vývodů
- **vlastní šum a zkreslení** - u ideálního OZ nulové, u reálného co nejnižší
- **malá spotřeba** - řádově v mW
- **fázový posun** - mezi vstupem a výstupem je 0° nebo 180°
- **CMRR** - potlačení souhlasného signálu je u ideálního OZ nekonečně velké, u reálného OZ má konečnou hodnotu udávanou v dB

3.2.2 Analýza vlivu CMRR na výstupní napětí

Potlačení souhlasného signálu přivedeného současně na oba vstupy udává činitel potlačení souhlasného signálu **CMRR**. Reálný OZ totiž kromě vstupního diferenčního napětí zesiluje také vstupní souhlasné napětí, což je nežádoucí vlastnost. Pokud na vstupu OZ dojde ke změně souhlasného napětí o ΔU_s , projeví se to na výstupu OZ změnou o ΔU_o . CMRR je definován jako poměr těchto změn, což lze vyjádřit jako:

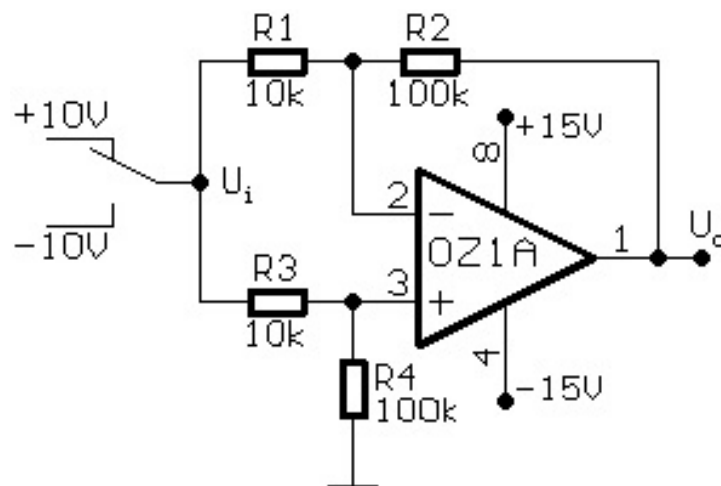
$$\text{CMRR} = 20 \cdot \log \left(\frac{\Delta U_s}{\Delta U_o} \right) \quad (29)$$

K jeho změření můžeme použít zapojení na obrázku 21.

K provedení požadovaného měření musíme zajistit změnu souhlasného napětí na vstupech o $2/3$ napájecího napětí OZ. Jako první přivedeme na vstup obvodu tedy napětí $+10\text{ V}$ a změříme napětí na výstupu vyjádřené jako U_{o1} . Poté přivedeme na vstup obvodu napětí -10 V a opět změříme napětí na výstupu, tentokrát vyjádřené jako U_{o2} [17].

CMRR pak vypočteme podle vztahu:

$$\text{CMRR} = 20 \cdot \log \left(\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\Delta U_i}{\Delta U_o} \right) \quad (30)$$



Obrázek 21: Schéma zapojení k určení CMRR u OZ MA1458[17]

kde ΔU_i je změna napětí na vstupu obvodu ± 10 V, tzn. 20 V a hodnota ΔU_o je odpovídající změna napětí na výstupu OZ, tzn. $U_{o1} - U_{o2}$. Pro uvedené zapojení s danými hodnotami součástek a napětí lze napsat, že:

$$\text{CMRR} = 20 \cdot \log \left(\frac{200}{U_{o1} - U_{o2}} \right) \quad [\text{dB}; V] \quad (31)$$

Z uvedené analýzy vyplývá, že hodnota CMRR je při potřebě měřit malé rozdíly napětí důležitá a z tohoto důvodu je potřeba při výběru OZ do aplikace magnetometru s tímto parametrem počítat.

3.2.3 Invertující zesilovač

Invertující zesilovač je jedno z nejpoužívanějších zapojení. Zapojení invertujícího zesilovače s OZ je na obrázku 22. Vstupní napětí je přivedeno přes rezistor R_1 na invertující vstup OZ. Ten toto napětí zesílí a na jeho výstupu se tedy objeví zesílené vstupní napětí, avšak s opačnou polaritou. Toto výstupní napětí je přes rezistor R_2 rovněž přivedeno na invertující vstup OZ a protože má opačnou polaritu, zmenšuje napětí na invertujícím vstupu. Protože má OZ velké (ideálně nekonečné) zesílení, ustálí se obvod ve stavu, kdy je na invertujícím vstupu jen velmi malé (ideálně nulové) napětí. Tento bod se proto někdy nazývá virtuální zem. Na výstupu se objeví vstupní napětí vynásobené zápornou konstantou (tedy zinvertované). [16]

Vstupní napětí také vyvolá proud tekoucí rezistorem R_1 . Tento proud však z důvodu vysokého vstupního odporu nemůže téci do vstupu OZ, a proto teče přes rezistor R_2 do výstupu OZ. Rezistory R_1 a R_2 v podstatě fungují jako odporový dělič, který má ve středu nulové napětí. OZ se vždy snaží mezi vstupy udržet nulové napětí. Proto říkáme, že na vstupu je tzv. plovoucí zem. [16]

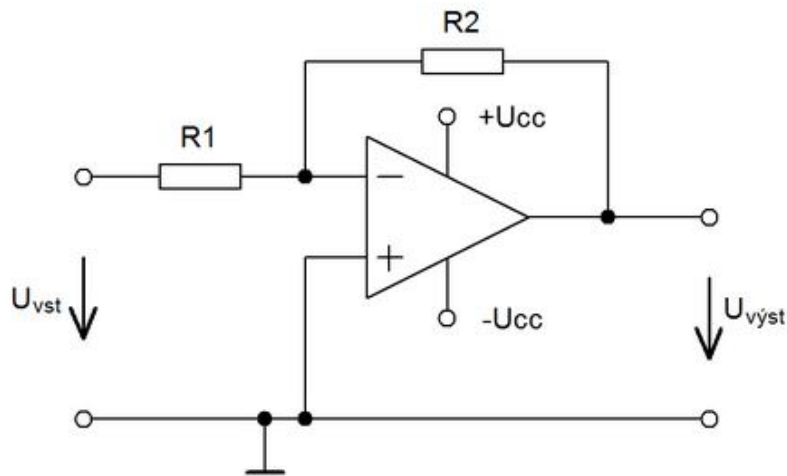
Dle prvního Kirchoffova zákona můžeme pro invertující vstup napsat rovnici:

$$\frac{U_{\text{vst}}}{R_1} + \frac{U_{\text{vyst}}}{R_2} = 0 \quad (32)$$

Můžeme tedy odvodit, že:

$$U_{\text{vyst}} = -U_{\text{vst}} \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (33)$$

$$A_U = \frac{U_{\text{vyst}}}{U_{\text{vst}}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (34)$$



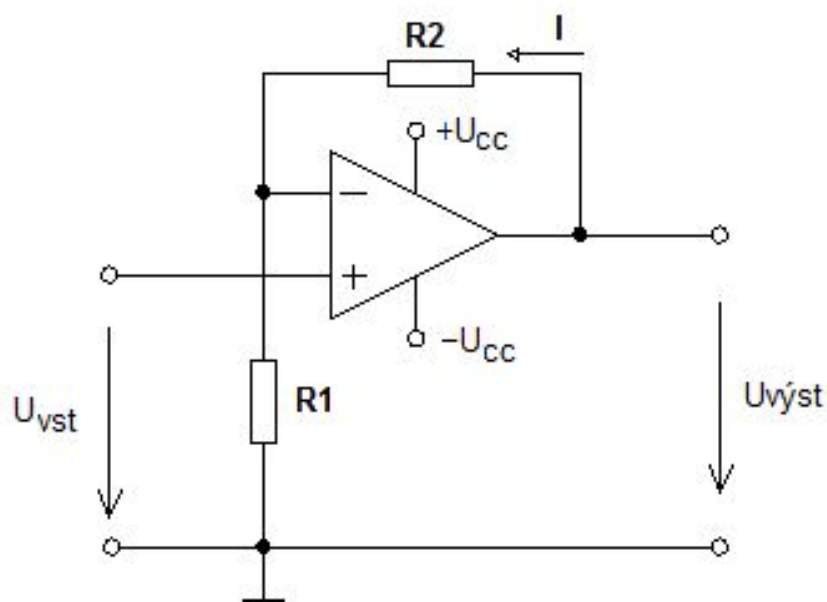
Obrázek 22: Schéma zapojení invertujícího zesilovače s OZ[16]

3.2.4 Neinvertující zesilovač

Neinvertující zesilovač zesiluje (násobí konstantou vždy větší než 1) vstupní napětí. Oproti invertujícímu zesilovači, který má vstupní impedanci danou velikostí odporu R_1 , se u tohoto zapojení vstupní impedance blíží nekonečnu a nezávisí na hodnotách odporů R_1 a R_2 . Výstupní zesílený napěťový signál je ve stejné fázi se vstupním napěťovým signálem. Přivedeme-li na vstup kladné napětí, na výstupu bude zesílené napětí také kladné polarity. Zapojení OZ jako neinvertujícího zesilovače je na obrázku 23. [15] Výpočet zesílení spočítáme:

$$U_{\text{vst}} = R_1 \cdot I \quad U_{\text{vyst}} = (R_1 + R_2) \cdot I \quad (35)$$

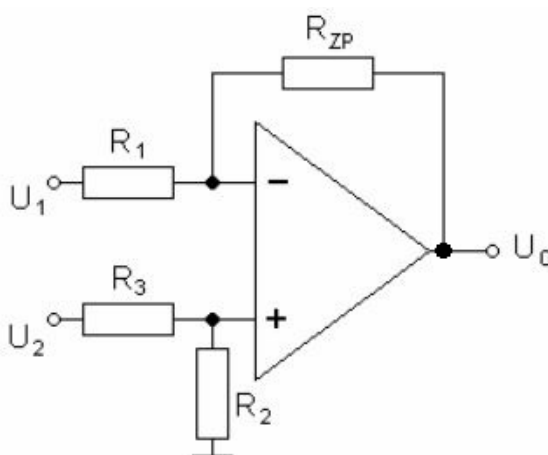
$$A_U = \frac{U_{\text{vyst}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot I}{R_1 \cdot I} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (36)$$



Obrázek 23: Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače s OZ[15]

3.2.5 Rozdílový (diferenční) zesilovač

Tento způsob zapojení se používá pro porovnání dvou napětových signálů, které se od sebe napětově příliš neliší. Výstupní napětí je úměrné rozdílu napětí na obou vstupech. Schéma zapojení rozdílového zesilovače je na obrázku 24. Napětí na odporu R_2 působí jako souhlasné napětí na obou vstupech, jelikož mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem je napětí prakticky nulové. Z tohoto důvodu je potřeba u tohoto typu zapojení zvolit OZ s velkým potlačením CMRR, zejména pokud bude nastaveno velké zesílení pro užitečný signál. Jinak by souhlasný signál na výstupu mohl být srovnatelný s užitečným rozdílovým signálem.



Obrázek 24: Schéma zapojení rozdílového zesilovače s OZ [13]

Pro zesílení neinvertujícího vstupu platí [14]:

$$A_{U+} = \frac{R_1 + R_{ZP}}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_3 + R_2} \quad \text{při } U_1 = 0 \quad (37)$$

Pro zesílení invertujícího vstupu platí [14]:

$$A_{U-} = -\frac{R_{ZP}}{R_1} \quad \text{při } U_2 = 0 \quad (38)$$

Výstupní napětí lze spočítat podle vzorce [14]:

$$U_0 = A_{U+} \cdot U_2 + A_{U-} \cdot U_1 \quad (39)$$

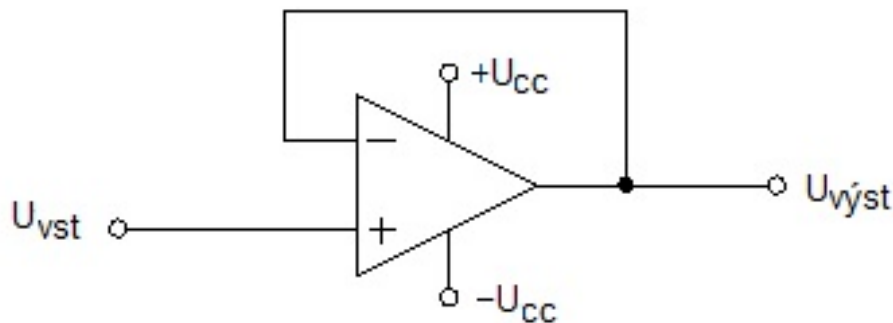
Po dosazení dostaneme [14]:

$$U_0 = \frac{R_1 + R_{ZP}}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_3 + R_2} \cdot U_2 - \frac{R_{ZP}}{R_1} \cdot U_1 \quad (40)$$

3.2.6 Napěťový sledovač

Jedná se o zapojení s OZ, kde je výstup propojen s invertujícím vstupem. Zesílení $\mathbf{A} = 1$, z čehož je zřejmé, že napětí na výstupu je rovno napětí vstupnímu. Vstup sledovače má podobně jako u neinvertujícího zesilovače impedanci blížící se nekonečnu. Výstupní impedance je daná vlastnostmi použitého operačního zesilovače a je velmi nízká. Sledovače se používá k impedančnímu oddělení obvodů, aby nedocházelo k jejich ovlivňování. Lze toho využít například k propojení výstupu OZ se vstupem A/D převodníku.

Schéma zapojení je na obrázku 25.



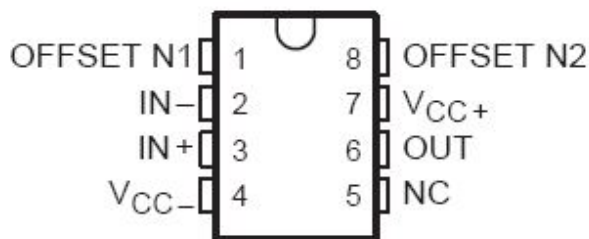
Obrázek 25: Schéma zapojení sledovače napětí s OZ [15]

3.2.7 Operační zesilovač OP07CP

K měření napěťových rozdílů na Hallově sondě je potřeba zvolit vhodný operační zesilovač splňující několik kritérií. V první řadě by se mělo jednat o zesilovač s velmi nízkým šumem, s nízkým napěťovým offsetem, velkou vstupní impedancí a minimální změnou parametrů v závislosti na teplotě. Velmi důležitým parametrem je také hodnota CMRR (potlačení souhlasného signálu) viz kapitola 3.2.2, která by měla být dostatečně velká.

Jako nejvhodnější obvod byl nakonec zvolen **OP07CP**, který je v měřicích přístrojích hojně využíván pro svoji schopnost velmi přesně zesilovat signály s nízkou úrovní. Cenově je také velmi výhodný a má jen o málo horší parametry, než jiné OZ, které jsou třeba i 4x dražší. Pouzdro obsahuje vývody pro korekci offsetu, které ale není nutno zapojovat, pokud korekci nepožadujeme. OZ nevyžaduje k funkci zapojovat ani žádné další externí součástky. Drobnou nevýhodou je poněkud vyšší spotřeba v porovnání s jinými OZ podobných parametrů a nutnost symetrického napájení, jelikož daný OZ by nebyl schopen pokrýt lineární části charakteristiky požadovaný pracovní rozsah. Jinak řečeno, OZ není schopen pracovat lineárně se vstupním napětím v rozsahu napětí napájecího a rozkmit výstupního napětí také nemá stejný rozsah, jako napětí napájecí. Proto musí být velikost napájecího napětí počítána s takovou rezervou, aby výstup spolehlivě zvládl rozkmit v lineární části charakteristiky na úroveň, kterou požadujeme[18].

Zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 26

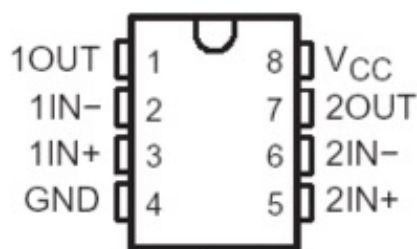


Obrázek 26: Zapojení vývodů pouzdra OP07CP [18]

3.2.8 Operační zesilovač LM358

Tento typ operačního zesilovače se vyznačuje vysokým ziskem, obsahuje frekvenční kompenzaci a pro svou činnost typicky nevyžaduje symetrické napájení. Má také velmi nízkou spotřebu, proto se často objevuje v zapojeních napájených bateriemi. Další předností tohoto obvodu je umístění dvou nezávislých OZ do jednoho pouzdra, což znamená úsporu místa na desce plošných spojů. Pro jednoduché aplikace je tento OZ sice použitelný, ale do přesnějších zařízení příliš vhodný není kvůli horším parametrům. Jelikož bude v detektoru plnit roli pouze jako sledovač napětí, nejsou na něj kladeny velké nároky a lze jej použít [19].

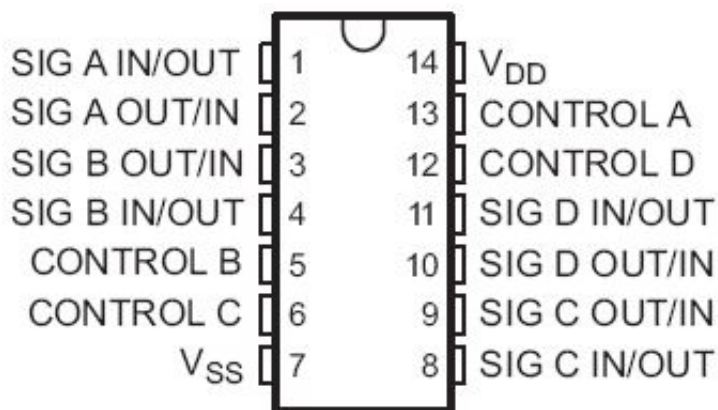
Zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 27



Obrázek 27: Zapojení vývodů pouzdra LM358 [20]

3.3 Obvod elektronických spínačů

Pro usnadnění obsluhy zařízení bude využit v zapojení obvod elektronických spínačů. Ty budou sloužit pro přepínání měřících rozsahů a pro spínání DC filtru. Pro zapojení byl zvolen obvod typ CMOS **4066B**. Jedná se o obvod obsahující v jednom pouzdru čtyři elektronické obousměrné analogové spínače, které jsou na sobě nezávislé a mají oddělené ovládání. Každý spínací kanál má řídicí vstup a dva vzájemně zaměnitelné vývody vstupu a výstupu. Pokud na řídicí vstup zavedeme stejné napětí, jako je na kladném napájecím pinu V_{SS} , dojde k otevření spínače. Přivedením napětí ze záporného napájecího pinu V_{DD} dojde k jeho uzavření. Při návrhu je třeba počítat s průchozím odporem, který se pohybuje v rozmezí stovek Ω , v závislosti na napájecím napětí. Se zvyšujícím se napětím mezi svorkami V_{SS} a V_{DD} se tento odpor snižuje [21]. Zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 28.

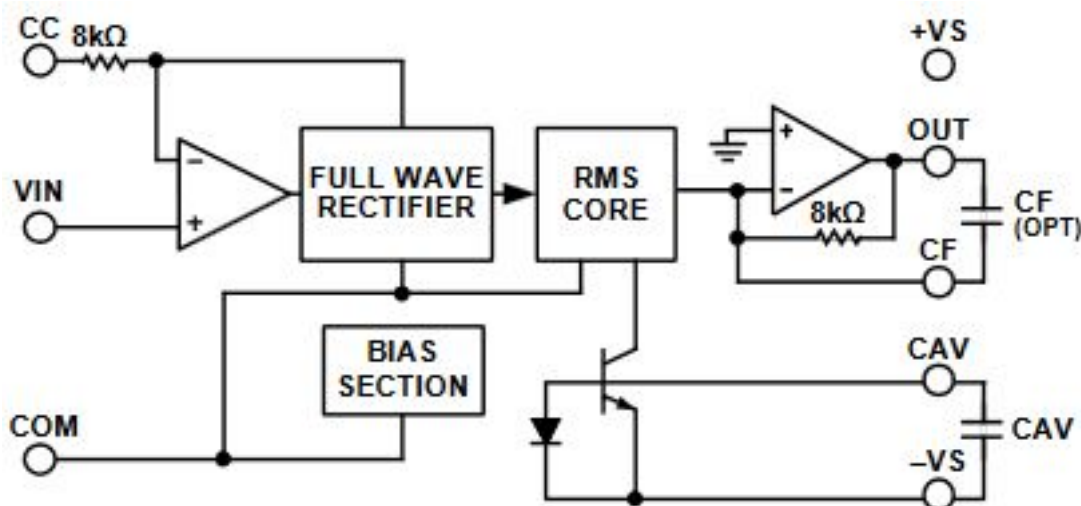


Obrázek 28: Zapojení vývodů pouzdra CMOS 4066 [21]

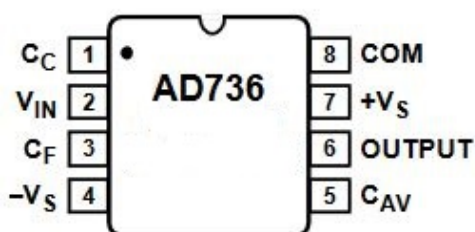
3.4 TrueRMS - DC konvertor

Vzhledem k tomu, že má magnetometr měřit i střídavé magnetické pole, je potřeba do obvodu zařadit usměrňovací prvek. K usměrnění signálu se nabízí možnost použití dvoucestného usměrňovače. Tento způsob řešení by byl ale poněkud složitější, protože by bylo nutno usměrňovač sestavit z operačních zesilovačů a několika externích součástek. Zásadní nevýhoda by spočívala

Blokové zapojení převodníku je na obrázku 29. To obsahuje vstupní zesilovač, dvoucestný usměrňovač, RMS jádro, BIAS obvod a výstupní zesilovač. Vstupní zesilovač poskytuje velkou vstupní impedanci vstupu VIN a zároveň nízkou impedanci vstupu CC, který má široký dynamický rozsah. RMS jádro provádí potřebné operace k výpočtu RMS hodnoty signálu s využitím průměrovacího kondenzátoru na vývodu CAV. BIAS obvod reguluje správné nastavení pracovního bodu. Výstupní zesilovač pracuje jako oddělovací a umožňuje zařadit dolní propust pomocí externí kapacity na vývodu CF, která je zapojena do zpětné vazby tohoto zesilovače. [22]



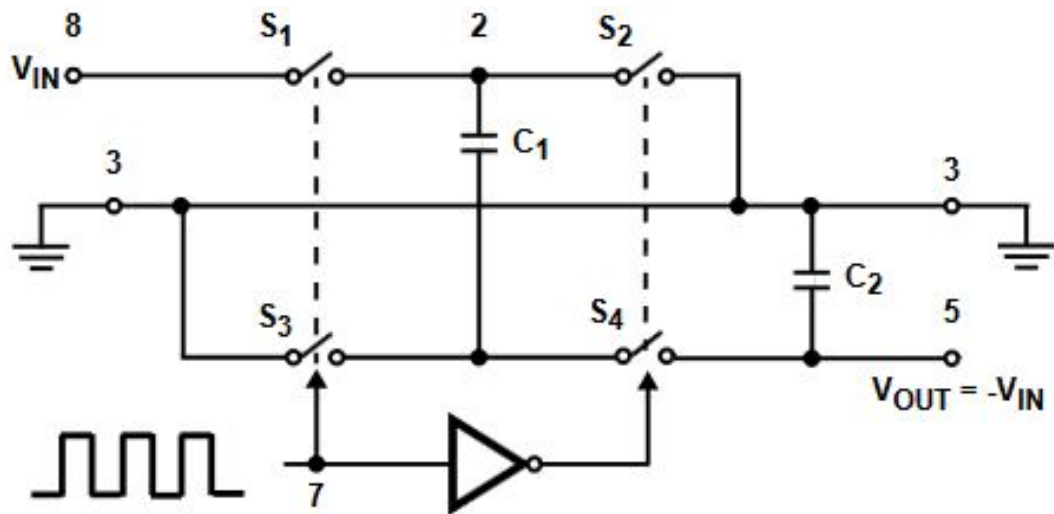
Zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 30.



41

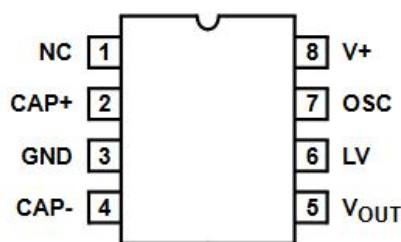
3.5 Konvertor záporného napětí

V kapitolách 3.2.7 a 3.4 jsem zmínil potřebu symetrického napájení v zapojení. Vzhledem k tomu, že není v napájení uvažováno se střídavým napětím např. z transformátoru, ze kterého by bylo možno záporné napětí usměrnit, ale se stejnosměrným zdrojem (baterie), musíme zvolit jiný způsob. Použití dvou zdrojů (baterií) je poměrně nepraktické, proto byla k vytvoření záporného napětí do obvodu přidána tzv. nábojová pumpa, která díky nízké spotřebě komponent postačuje. Pro aplikaci invertoru napětí byl vybrán obvod **ICL7660**, který je běžně k dostání, není příliš drahý a dokáže pracovat s napětím do 10 V s proudem do výstupu až 20 mA, což postačuje. Funkční schéma nábojové pumpy ve funkci invertoru je na obrázku 31. Jak už bylo zmíněno, invertor mění kladné napětí na záporné. To se děje za pomoci dvou párů polovodičových spínačů S_1 , S_3 a S_2 , S_4 , které jsou ovládány pravoúhlými signály tak, že během jedné půlperiody jsou spínače S_1 a S_3 sepnuty a spínače S_2 a S_4 rozepnuty. Kondenzátor C_1 se tak nabije na napětí U_{IN} . V další půlperiodě se S_1 a S_3 rozepnou a sepnou S_2 a S_4 . Kondenzátor C_1 je svým kladným pólem spojen se zemí a zároveň paralelně připojen ke kondenzátoru C_2 . Tím pádem se kondenzátor C_1 rozdělí o svůj náboj s kondenzátorem C_2 a pokud nebude připojena zátěž a spínače budou ideální, bude po prvním cyklu výstupní napětí na spojených kondenzátorech C_1 a C_2 proti zemi $U_{OUT} = -U_{OUT}/2$ za předpokladu, že $C_1 = C_2$. S každým dalším cyklem se napětí na C_2 bude zvyšovat a po určitém počtu cyklů bude výstupní napětí takové, že bude platit $U_{OUT} = -U_{IN}$. [24]



Obrázek 31: Funkční schéma nábojové pumpy ICL7660 ve funkci invertoru [23]

Zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 32.



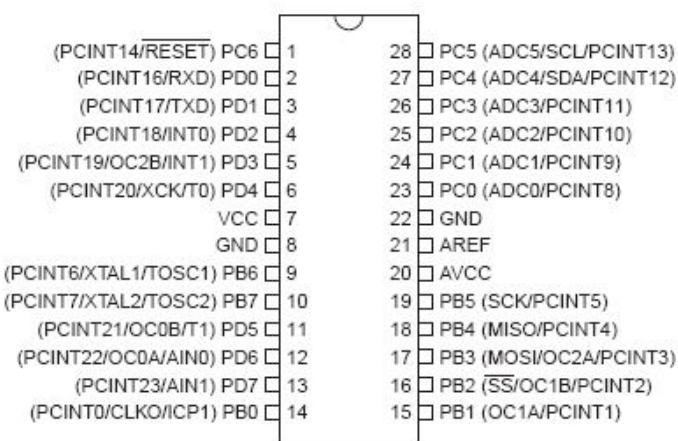
Obrázek 32: Zapojení vývodů pouzdra ICL7660 [23]

3.6 Mikrořadič

Aby bylo možno celé zařízení snadno realizovat, využijeme v zapojení obvodu mikrořadiče (mikroprocesoru), kterým zpracujeme naměřené hodnoty a zobrazíme je na zobrazovači. Zároveň jím budeme celé zařízení ovládat. Vzhledem k tomu, že se nejedná o nijak výpočetně náročnou aplikaci, postačí využít pouze jednoduchý procesor, který tím pádem bude i levný a energeticky úsporný. Jako možná varianta se jeví využití mikrořadiče **ATmega328P**, který je běžné dostupný, cenově výhodný a má dostatečný výkon. Navíc je pouzdro v provedení DIP28, což umožní obvod snadno instalovat na prototypovací desku. Výhodou je i snadné programování kódu, kde nám velmi usnadní práci použití knihoven např. pro ovládání zobrazovače.

ATmega328P je 8-bitový mikrořadič na architektuře RISC navržený firmou Atmel, který obsahuje 32 kB flash paměti pro vlastní kód programu, 1 kB EEPROM pro uložení uživatelských dat a 2 kB SRAM pro běh programu. Celkem obsahuje 23 vstupně/výstupních vývodů, které je možno nakonfigurovat pro využití jako sériová USART sběrnice, I²C sběrnice nebo sběrnice SPI. Mikrořadič dále poskytuje šest A/D převodníků o šířce 10 bitů. Maximální frekvence hodinového signálu je 20 MHz. [25]

Zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 33.



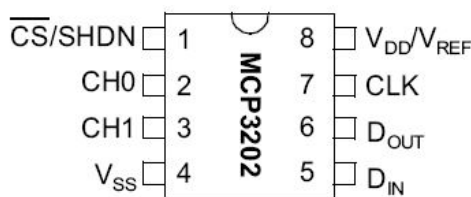
Obrázek 33: Zapojení vývodů pouzdra ATmega328P [25]

3.7 A/D převodník

Abychom mohli naměřenou hodnotu zpracovat procesorem a zobrazit na displeji, musíme ji nejprve převést analogově digitálním převodníkem (zkráceně A/D převodníkem) na číslo. A/D převodník je integrován i přímo v použitém mikrořadiči. Pokud se zaměříme na počet možných úrovní na vstupu A/D převodníku, které budeme potřebovat, musíme brát v úvahu rozsah měření. Dle zadání budeme měřit v rozsazích 1 mT, 10 mT a 100 mT, což činí pro DC měření 2000 možných úrovní v každém rozsahu, pokud budeme měřit s přesností na tři platné cifry a budeme zároveň rozlišovat směr magnetického pole (kladný nebo záporný). Interní A/D převodník v mikrořadiči je 10-bitový. Podle vztahu 2^n lze vyjádřit počet úrovní, které dokáže A/D převodník rozeznat (n vyjadřuje počet bitů převodníku). Dosazením dostaneme $2^{10} = 1024$ stavů.

Protože potřebujeme zpracovat 2000 možných úrovní, je tento interní převodník nedostatečný. Z tohoto důvodu je nezbytné použít převodník s vyšším počtem bitů. Jako nejvhodnější ohledně dostupnosti a ceny se jeví obvod **MCP3202**, který je 12-bitový a dokáže tedy rozlišit $2^{12} = 4096$ stavů, což postačuje i s rezervou. Tento převodník je dvoukanálový s postupnou aproximací. Vstupy je možné používat buď v Single-ended módu, kdy oba vstupy měří napětí nezávisle na sobě, nebo v Pseudo-differential módu, kdy se porovnává rozdíl napětí mezi oběma vstupy. Obousměrná komunikace s mikrořadičem bude zprostředkována sériovou sběrníci SPI. Napájení obvodu je společné i pro napětí reference. [26]

Zapojení vývodů pouzdra je na obrázku 34.



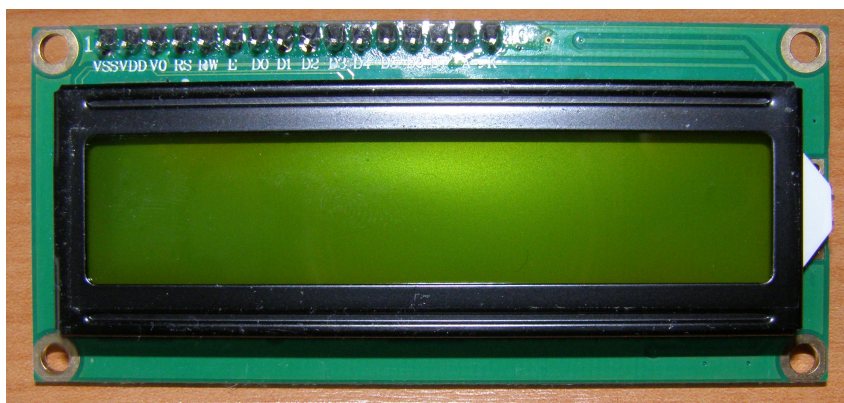
Obrázek 34: Zapojení vývodů pouzdra MCP3202 [26]

3.8 Displej

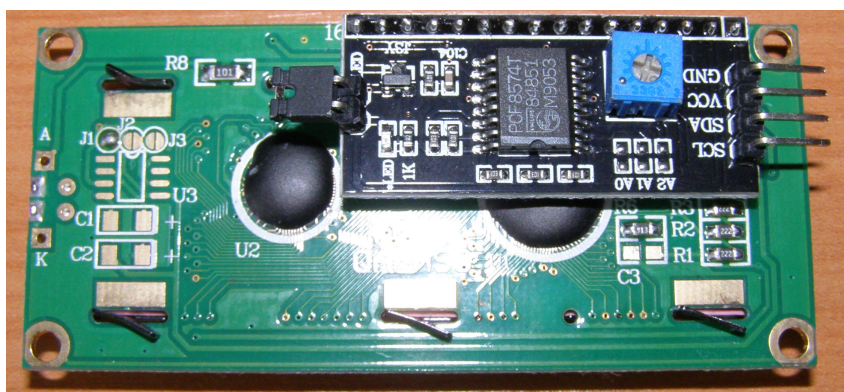
Ve specifikaci zadání je uveden jako zobrazovač dvouřádkový LCD. V tomto případě bude použit alfanumerický maticový displej 16x2, který zobrazí ve dvou řádcích 16 znaků. Displej obsahuje i podsvícení. Pro snadnější připojení k mikrořadiči byl zvolen model se sběrníci I²C, který potřebuje k funkci jen 4 vodiče. Propojení LCD na sběrnici I²C zajišťuje obvod PCF8574, který není nic jiného, než 8-bitový expander portů se sběrníci I²C na paralelní rozhraní stávajícího LCD a dokáže i přímo ovládat podsvícení displeje. Tento expander je umístěn na destičce za displejem, kde jsou obsaženy i piny pro sběrnici I²C, viz obrázek 36. Je naletováno přímo na stávající piny LCD. Modrý trimr slouží k nastavení kontrastu zobrazovače.

Tím, že bude displej propojen s mikrořadičem ATmega328P, stačí k obsluze použít vhodnou

knihovnu. [27] [28]



Obrázek 35: Dvojřádkový displej 16x2



Obrázek 36: Zadní strana displeje 16x2 s expandérem

4 Externí sériové sběrnice

Jak bylo již zmíněno v kapitolách 3.7 a 3.8, bude zařízení obsahovat dva typy sériových sběrnic typu SPI pro komunikaci s A/D převodníkem a I²C pro zápis údajů na LCD. Tyto sběrnice se v dnešní době hojně využívají v mnoha zařízeních. Ve spojení s mikrořadičem ATmega328P lze tyto sběrnice snadno ovládat pomocí dodaných knihoven.

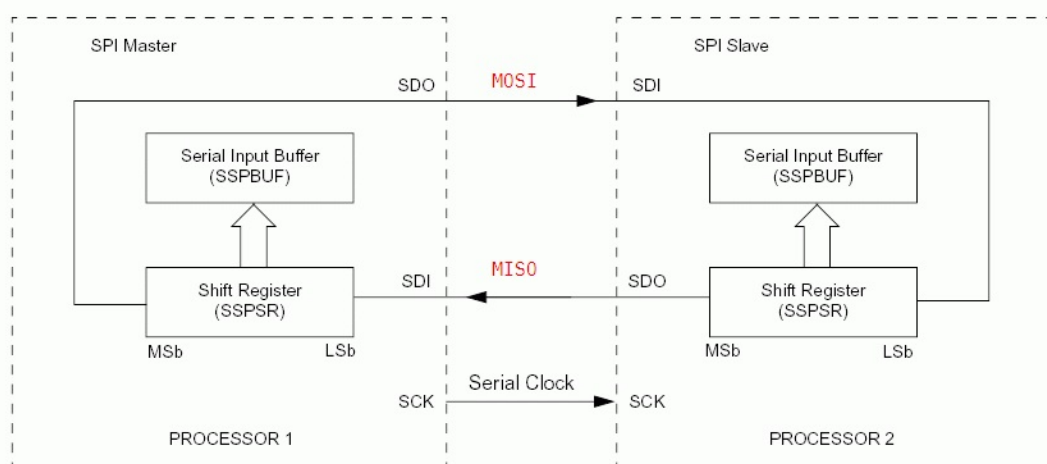
4.1 Sběrnice SPI

Sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface) je jedna z typů sériových externích sběrnic sloužících pro vzájemné propojení dvou nebo více komunikujících uzlů. Jeden uzel vystupuje v roli takzvaného řadiče sběrnice (master), ostatní uzly pracují v režimu slave. Uzel pracující jako master zároveň obsahuje generátor hodinového signálu, který je rozveden do všech ostatních uzlů. Tímto je umožněn synchronní přenos dat. Hodinový signál je rozváděn vodičem označovaným jako SCK. Uzly jsou dále propojeny dvojicí vodičů označovaných jako MISO (Master In, Slave Out) a MOSI (Master Out, Slave In), pomocí nichž se obousměrně přenáší data. Posledním vodičem, který je pro činnost sběrnice potřebný, je vodič značený jako SSEL (Slave Select), jehož signál slouží k výběru některého z uzlu pracujícího v režimu slave, se kterým se bude komunikovat. Pro všechny čtyři signály SCK, MISO, MOSI i SSEL postačují pouze jednosměrné porty, což zjednodušuje a zlevňuje využití této sběrnice.[30]

4.1.1 Výhody a nevýhody sběrnice

Mezi hlavní přednosti této sběrnice patří její snadná implementace. Jednoduché je jak její elektrické rozhraní kompatibilní s technologií TTL, tak i přenosový protokol. SPI je v podstatě několik externě propojených posuvných registrů, jejichž posun je řízen jednotným hodinovým signálem. Jednoduchost přenosového protokolu je dána i tím, že jsou data přenášena obousměrně po samostatných vodičích. Tím pádem není nutné řešit přepínání mezi vysíláním a příjmem. I přenosová rychlost je pro mnoho účelů dostatečně vysoká. Hodinová frekvence se pohybuje v rozsahu 1 MHz až 10 MHz. Při dodržení dostatečně malé kapacity mezi vodiči je možné použít frekvenci až 70 MHz.[30]

Mezi nevýhody patří především existence pouze jednoho zařízení, které může pracovat v režimu master. Existuje sice možnost použít zapojení označované jako multiple master, ale to již vyžaduje použití složitějšího přenosového protokolu, čímž přijdeme o jednoduchost celého řešení. Další nevýhoda spočívá v možnosti přenášet data jen na kratší vzdálenosti, protože by mohlo docházet při přenosu hodinového signálu ke zpoždění. V přenosovém protokolu také není obsažen signál typu ACK, kterým by se potvrzoval příjem dat a dovoľoval tak řídit rychlost přenosu, aby se eliminoval problém se zařízeními, které nejsou schopné dostatečně rychle zpracovat data.[30]



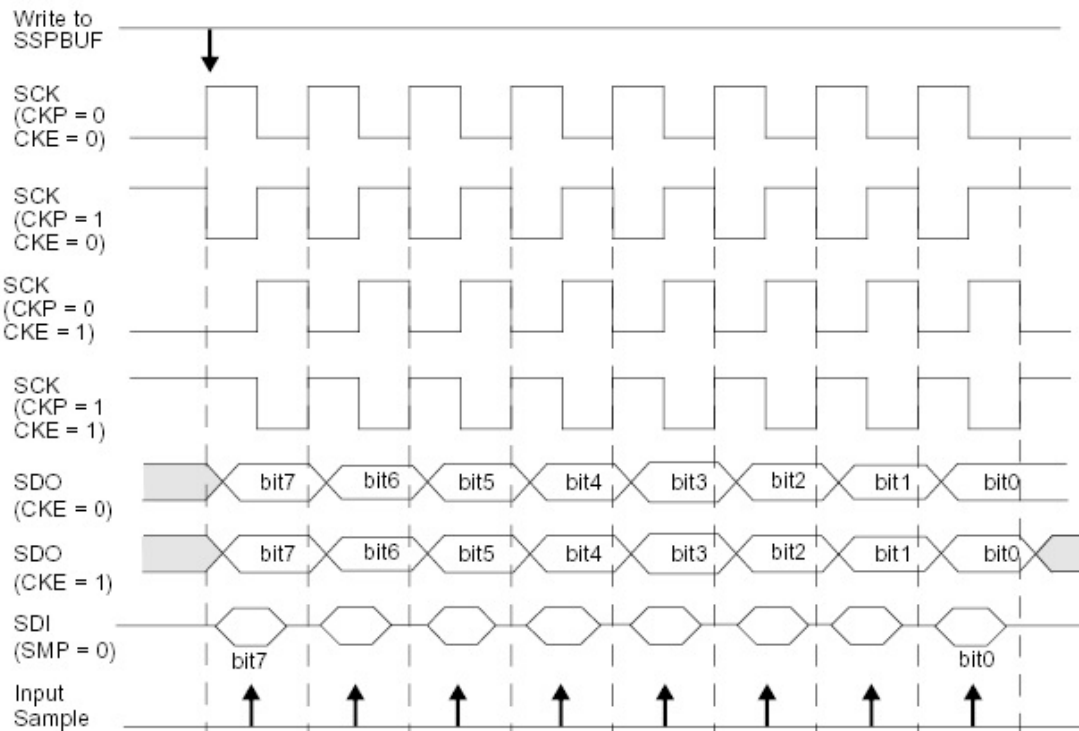
Obrázek 37: Propojení dvou uzlů sběrnice SPI [30]

4.1.2 Princip komunikace

Způsob propojení dvou uzlů sběrnice SPI je znázorněn na obrázku 37. Oba uzly obsahují v tom nejjednodušším případě dva registry – datový záchytný registr Serial Input Buffer (SSPBUF) a posuvný registr Shift Register (SSPSR). Do registru SSPSR je zapsán bajt, který byl korektně přijat, ale ještě nebyl zpracován, tj. mikrořadič si jeho obsah nepřečetl. Tento registr se tedy využívá jako jednoprvková fronta starající se o to, že nedojde ke ztrátě dat. Posuvný registr SSPSR slouží současně k vysílání i příjmu jednoho bitu z celého bajtu. Každý posun obsahu tohoto registru doprava znamená, že se vysunutý bit pošle na pin SDO (v případě uzlu typu master se jedná o vodič MOSI) a naopak logická hodnota přečtená na pinu SDI (MISO) je zapsána do nejnižšího bitu posuvného registru. Jeden z uzlů pracuje v režimu master, druhý v režimu slave. Vysílání i příjem jednoho bitu je tedy nedělitelná operace, která vždy proběhne ve stejný okamžik. Nejdříve je vždy vyslán nejvyšší bit přenášeného bajtu.[30]

Uzel pracující v režimu master generuje hodinové impulsy, které jsou posílány po vodiči SCK. Pomocí hodinových pulsů je prováděna synchronizace vysílání i příjmu dat, kdy má docházet ke změně posuvných registrů SSPSR. U většiny zařízení je možné nakonfigurovat polaritu hodin a zda se má posun provádět při sestupné nebo vzestupné hraně hodinového signálu. Čtyři možné tvary hodinového signálu jsou zobrazeny na osmém obrázku. Konfiguračním bitem CKP je určena polarita hodinového signálu. Konfigurační bit CKE zase určuje, zda se data oznamují vzestupnou či sestupnou hranou hodinového signálu. Kombinací těchto dvou bitů vznikají čtyři způsoby, jak synchronizovat přenos. Možné způsoby synchronizace přenášených dat ukazuje obrázek 38. [30]

V případě, že potřebujeme komunikovat s více zařízeními, musíme pomocí pinů CSx respektive SSELx zvolit slave zařízení, se kterým chceme komunikovat. Těchto pinů potřebujeme tolik, kolik je zařízení. V jednu chvíli je možno komunikovat pouze s jedním zařízením, jinak by došlo ke



Obrázek 38: Synchronizace přenášených dat sběrnice SPI [30]

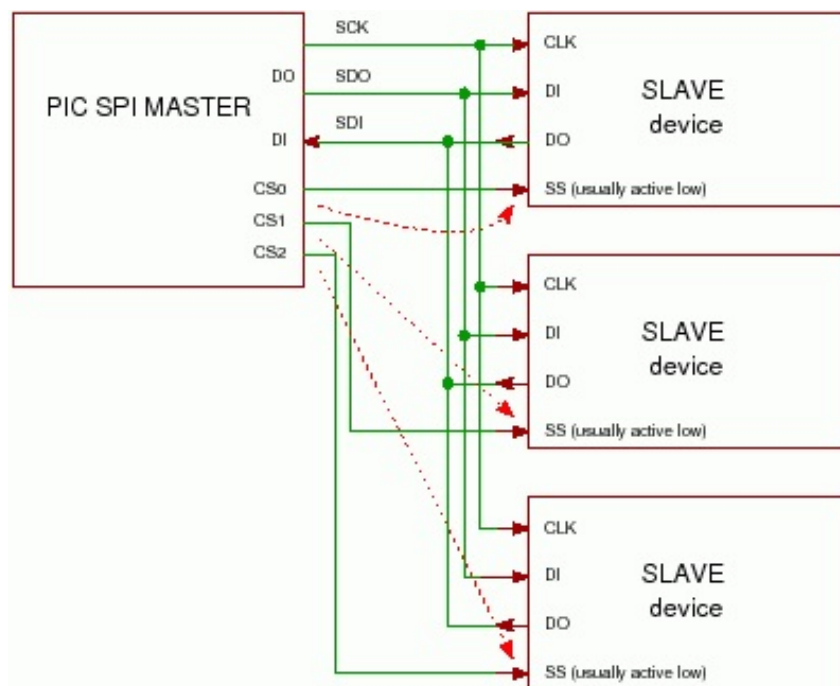
kolizi. Typické zapojení více zařízení na sběrnici SPI ukazuje obrázek 39.

Nevýhodou tohoto zapojení je možný nedostatek pinů k ovládání signálu SSEL při větším množství komunikujících zařízení, proto existuje ještě možnost zapojení uzlů do kaskády, kde dojde ke zřetězení zapojených zařízení, viz obrázek 40. Hodinový signál je rozveden do všech uzlů paralelně, kdežto datové vodiče jsou zapojeny do kruhu. Takto zapojené uzly jsou v podstatě rozšířením jednoho bajtu na více bajtů nabývajících na velikosti paměti přímo úměrně počtu uzlů. Nevýhodou tohoto zapojení je skutečnost, že v případě výpadku jednoho uzlu dojde k rozpadu celého spojení. [30]

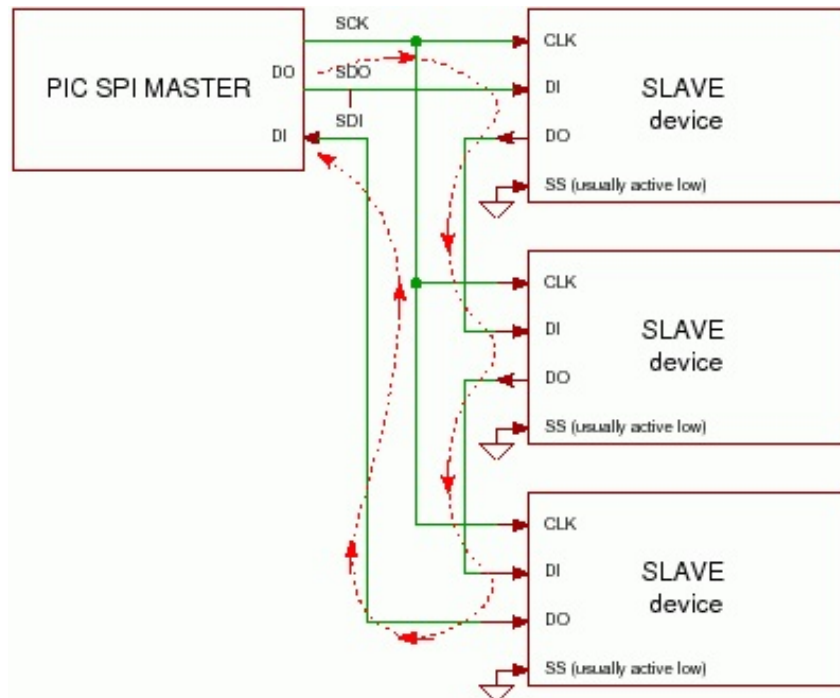
4.2 Sběrnice I²C

Sběrnice I²C používá stejně jako sběrnice SPI hodinový signál společný pro všechny připojená zařízení. Komunikace ale probíhá pouze jako poloduplexní, tzn. že v jeden moment vysílá pouze jedno zařízení a většinou jen jedno zařízení data přijímají. Co se týká výběru zařízení slave, tak u této sběrnice se nevyužívá volba pomocí signálu SSEL, ale pomocí jednoznačné adresy, která je přidělena každému uzlu. Jedná se o sedmibitovou nebo speciální desetibitovou adresu. Pomocí sedmibitové adresy lze teoreticky rozlišit až 128 různých zařízení. Musíme ale odečíst několik rezervovaných adres, které nelze použít. [31]

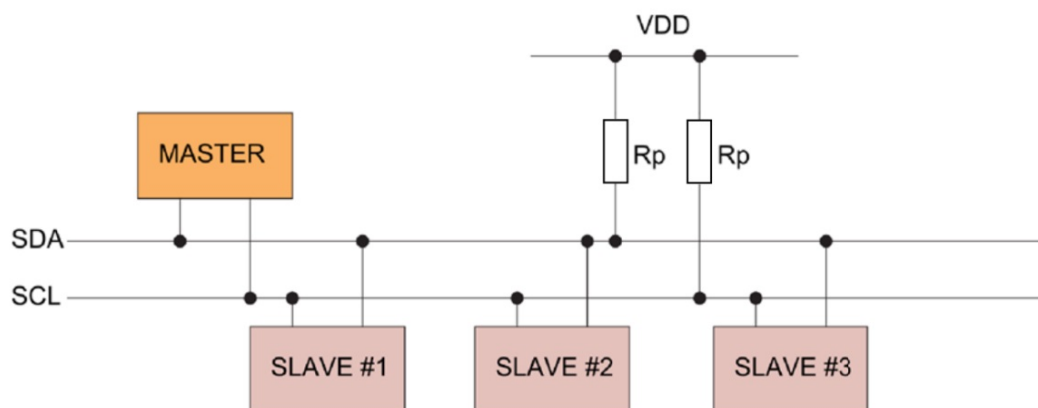
Sběrnice je tvořena dvojicí signálových vodičů označovaných jako SDA a SCL. Vodič SDA slouží k obousměrnému přenosu dat a SCL k synchronizaci uzlů pomocí hodinového signálu. Oba



Obrázek 39: Propojení více zařízení s ovládáním uzlů pomocí signálu SSEL na sběrnici SPI [30]



Obrázek 40: Propojení více zařízení do řetězu na sběrnici SPI [30]



Obrázek 41: Propojení zařízení na sběrnici I²C [32]

vodiče musí mít společnou signálovou zem a dále musí být zapojeny přes pull-up rezistory na napájecí napětí, aby v případě klidového stavu na nich byly stavy úrovně H. Propojení úzlů na I²C znázorňuje obrázek 41. Odpory R_p jsou pull-up rezistory. Veškeré řízení sběrnice má na starosti zařízení nakonfigurované do režimu master. V jednu chvíli může jako master pracovat pouze jediné zařízení, čímž je zaručeno, že na sběrnici nebude docházet ke kolizím. Slave zařízení nemůže ani požádat o příjem nebo vysílání dat. Pokud má slave zařízení potřebu odesílat data např. z nějakého senzoru, musí zařízení master zaslat dotaz na jeho stav. Tento problém by bylo možno vyřešit přidáním dalšího vodiče k mikrořadiči, kterým by byl poslán požadavek na zahájení komunikace nebo použít režim multi-master, který ale není vždy podporován.[31]

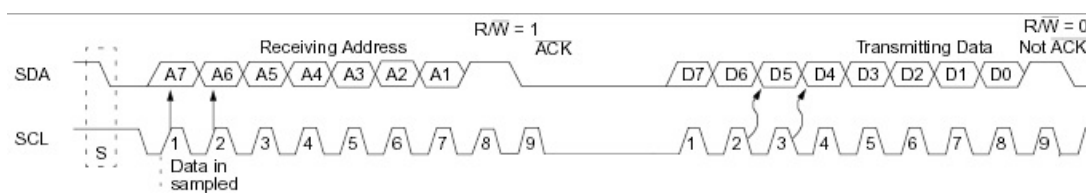
Zahájení komunikace zprostředkovává zařízení master. V době, kdy nejsou přenášena žádná data je na obou signálových vodičích SDA a SCL napěťová úroveň logické jedničky díky pull-up rezistorům. Komunikaci zahajuje master tak, že sníží úroveň na vodiči SDA na logickou nulu, zatímco SCL si po určitou dobu udržuje stav logické jedničky. Tato doba je závislá na zvolené přenosové rychlosti. Tento stav označujeme jako start bit. Na obrázku 42 je označen jako S. Ihned po jeho vyslání začne master vysílat adresu uzlu, se kterým se bude komunikovat. Dále se vyšle bit, který určuje, zda má komunikující uzel data vysílat nebo přijímat.[31]

Pokud ke komunikaci použijeme sedmibitovou adresu, tak po přenesení start bitu dojde k přenosu všech osmi bitů (sedm bitů adresy + osmý bit s určením směru přenosu dat). Poté provede každý uzel slave porovnání přijaté adresy se svoji vlastní adresou. Vybraný uzel totiž musí potvrdit, že se na sběrnici skutečně nachází. Potvrzení (bit ACK) se pošle zpět na zařízení typu master, ke kterému dojde v devátém cyklu hodin. Příjem logické nuly masterem značí, že adresovaný uzel existuje a je připraven ke komunikaci. Logická jednička znamená, že uzel s danou adresou buď neexistuje, je odpojen, nebo není připraven komunikovat. Poté dochází k přenosu dat, přičemž je každých 8 přenesených bitů potvrzováno bitem ACK. [31]

Průběh komunikace je na obrázku 42.

Specifikace sběrnice I²C stanovuje i několik standardních přenosových rychlostí. Nejběžněji se

používají rychlosti 10 kb/s, 100 kb/s nebo 400 kb/s. Rychlosti 1 Mb/s a 3,4 Mb/s nejsou příliš podporovány.

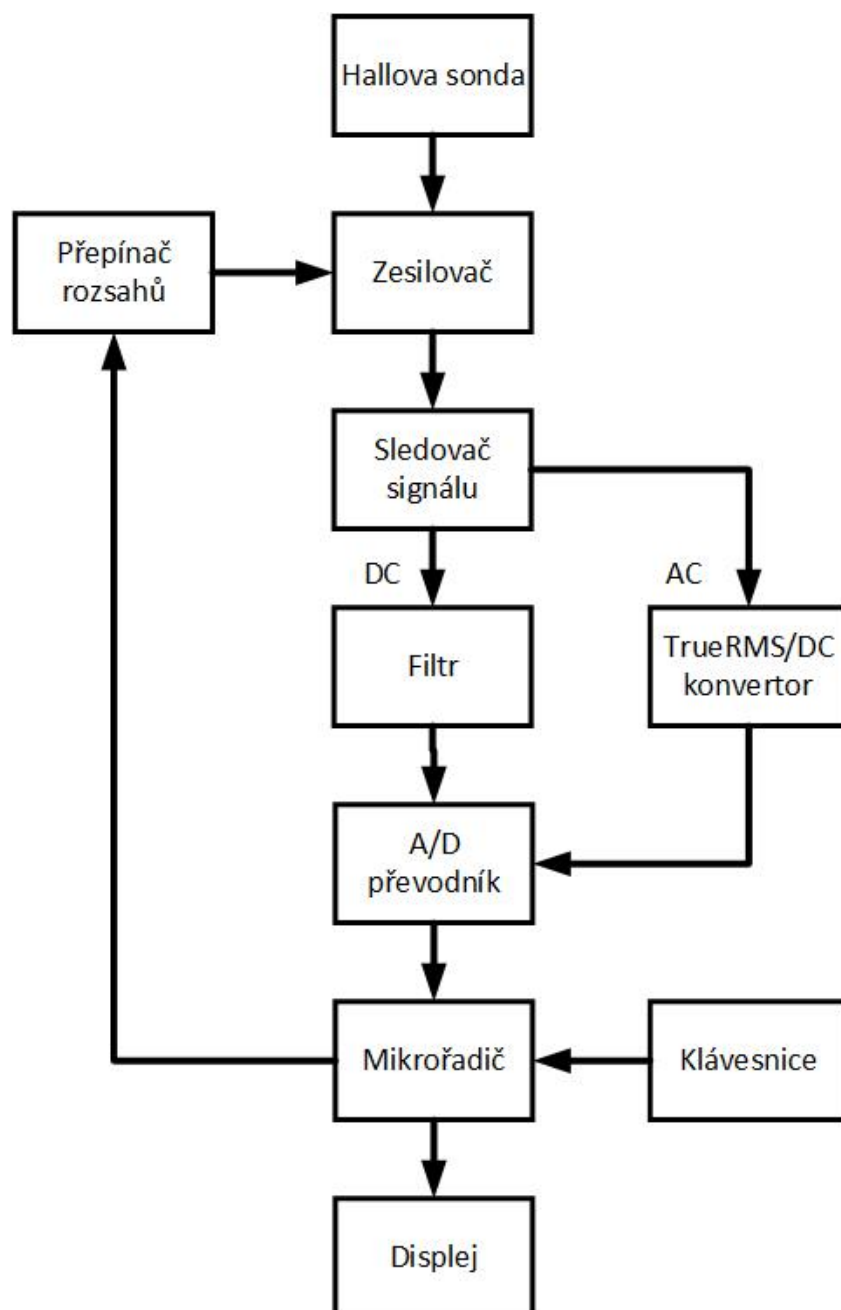


Obrázek 42: Průběh komunikace sběrnice I²C při adresování uzlů pomocí sedmibitové adresy. [31]

5 Obvodové zapojení

Kompletní schéma zapojení detektoru je na obrázku 51. Blokové schéma je na obrázku 43. Jednotlivé části zapojení si popíšeme následujících podkapitolách.

5.1 Blokové schéma detektoru



Obrázek 43: Blokové schéma detektoru

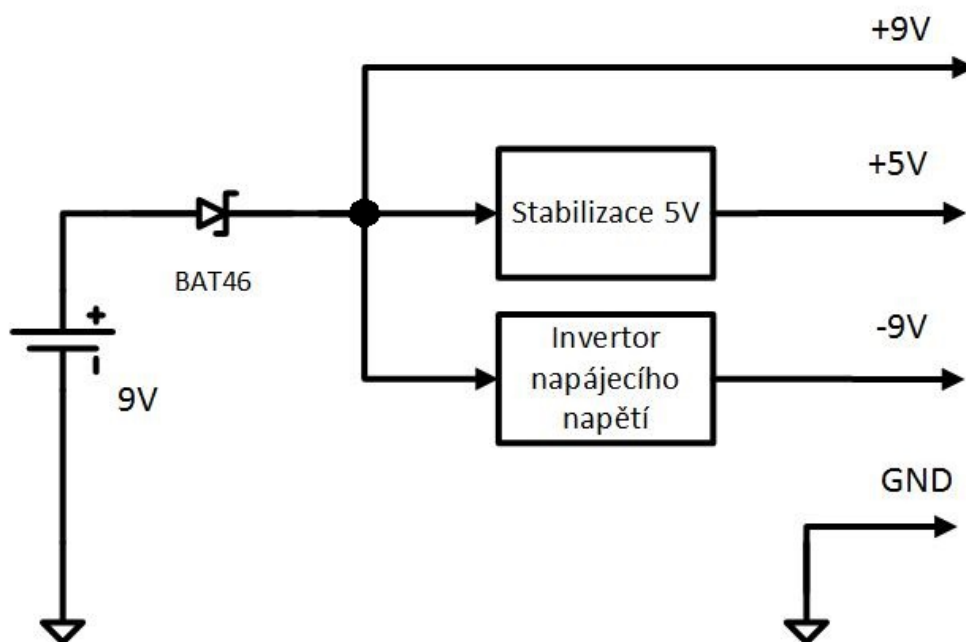
5.2 Napájecí část

Jelikož se jedná o přenosné zařízení, byla jako zdroj napájení využita baterie 9 V, popř. 6 článků 1,5 V baterií typu AA (tužkové), ale lze využít i napájecí adaptér na 9 V. Vyšší napětí přesahující 10 V by už překročilo maximální vstupní napětí pro nábojovou pumpu generující záporné napětí. Jako ochrana proti přepólování slouží Schottkyho dioda D_1 typ BAT46 zapojená do série, která má velmi malý úbytek napětí [29].

Napájecí napětí 9 V z baterie se pomocí nábojové pumpy IC1, viz kapitola 3.5, invertuje na záporné napětí -9 V, které slouží jako symetrické napájení pro OZ IC2, IC4 a pro TrueRMS konvertor IC9. Kondenzátory C_2 a C_3 je vhodné použít s nízkým sériovým odporem (ESR) kvůli pulsní zátěži. K vlastnímu zapojení invertoru bylo použito doporučené zapojení výrobce podle datasheetu [23].

Napětí 9 V se dále stabilizuje pomocí obvodu IC3 L7805 na 5 V větev, která se využívá pro napájení mikrořadiče IC7, napájení A/D převodníku IC8, obvod elektronických spínačů CMOS IC6, LCD displeje, odporového děliče R_5 , R_6 , R_9 a Hallovy sondy IC5.

Blokové zapojení zdrojové části je na obrázku 44.



Obrázek 44: Blokové zapojení zdrojové části

5.3 Hallova sonda

Hallová sonda IC5 sloužící k detekci magnetického pole byla umístěna na stíněný třížilový vodič a opatřena ochrannou bužírkou proti poškození. Napájení sondy je řešeno z 5 V napájecí větve. Jelikož kabel vedoucí k sondě by mohl působit jako anténa přijímající vysokofrekvenční elektromagnetické rušení např. od pulzních obvodů, rádiového vysílání atd. je na výstupu sondy

zapojen kondenzátor C_8 pro potlačení těchto vlivů. Signál ze sondy je dále zpracováván zesilovačem.

Podrobnější popis Hallový sondy je uveden v kapitolách 2.1 a 3.1.

5.4 Zesilovač s proměnným ziskem

Abychom mohli s Hallovou sondou pracovat, musíme použít zesilovač s vhodným zesílením. Jelikož má mít zařízení tři rozsahy, bude zesilovač obsahovat možnost změny zesílení ve třech stupních. Výstup sondy má v klidovém stavu napětí 2,5 V, přičemž při působení magnetického pole se hodnota napětí buď snižuje nebo zvyšuje v závislosti na intenzitě a směru indukčních čar. V tomto případě je potřeba použít zesilovač s posunou nulou. Při volbě správného zesílení budeme vycházet z předpokladu, že zvolená sonda má podle výrobce citlivost 1,3 mV/G neboli 0,13 mV/mT ($1 \text{ G} = 0,1 \text{ mT}$). Zesílení musíme zvolit takové, abychom na výstupu zesilovače dosáhli (např. při zvolení druhého rozsahu 10 mT) citlivosti 100 mV/1 mT. 1 mV bude tedy na druhém rozsahu vyjadřovat magnetickou indukci 0,01 mT. Jinak řečeno, pokud budeme měřit indukci 10 mT na druhém rozsahu (max. hodnota rozsahu), bude na výstupu Hallový sondy při správné polarizaci napětí 2,63 V (2,5 V výchozí napětí + 0,13 V výchylka). Na výstupu zesilovače musí být v tomto případě napětí 3,5 V (2,5 V výchozí napětí + 1,0 V výchylka). Na každém rozsahu budeme měřit na tři platná místa. Z toho vyplývá, že jeden digit na displeji bude reprezentovat změnu napětí o 1 mV na výstupu zesilovače, nezávisle na tom, jaký bude zvolený rozsah 1 mT, 10 mT nebo 100 mT. Tomu musíme přizpůsobit zesílení jednotlivých rozsahů.

Zjednodušené zapojení zesilovače je na obrázku 45.

5.4.1 Odvození vztahů pro výpočet

K řešení návrhu zesilovače použijeme metodu superpozice. U této metody výpočet rozdělíme na více částí, v tomto případě na dvě. První část bude řešit případ kdy v obvodu bude působit jen U_3 a ve druhém jen U_1 , viz obrázek 45.

a) $U_3 \neq 0$, $U_1 = 0$

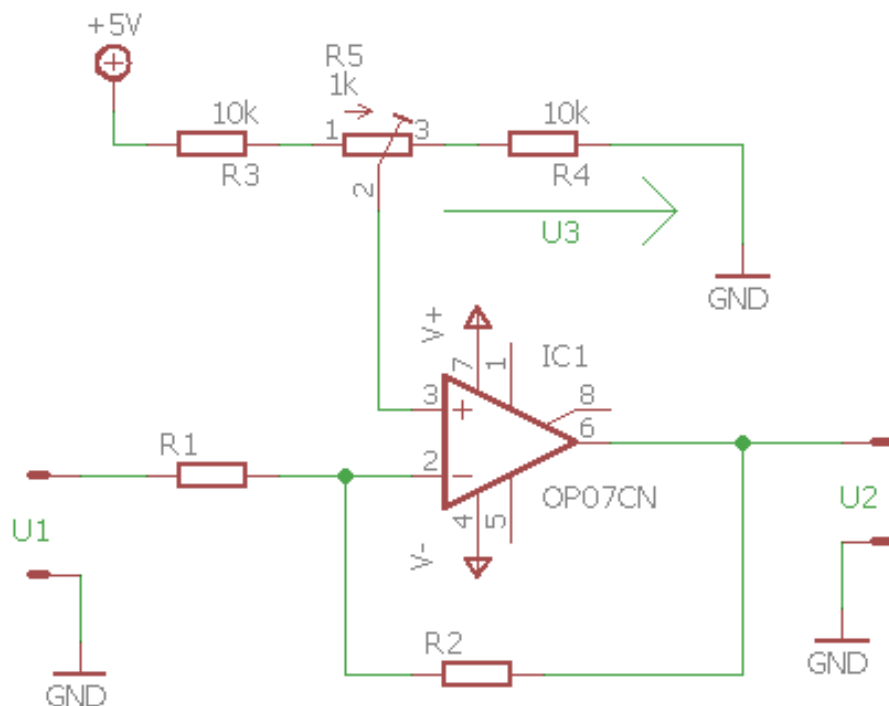
Odpor R_1 ukostříme, čímž nám vznikne zapojení neinvertujícího zesilovače, viz obrázek 23. Pokud na obrázku U_{vst} nahradíme U_3 a U_{vyst} nahradíme U_{2a} , pak platí:

$$U_{2a} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_3 \quad (41)$$

b) $U_1 \neq 0$, $U_3 = 0$

Vstup přivádějící napětí U_3 uzemníme, čímž nám vznikne zapojení invertujícího zesilovače, viz obrázek 22. Pokud na obrázku U_{vst} nahradíme U_1 a U_{vyst} nahradíme U_{2b} , pak platí:

$$U_{2b} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_1 \quad (42)$$



Obrázek 45: Zapojení invertujícího zesilovače s posunutou nulou

Pro zapojení zesilovače podle obrázku 45 dostaneme:

$$U_2 = U_{2a} + U_{2b} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_3 - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_1 \quad (43)$$

Pomocí U_3 lze nastavit $U_2 = 0$ pro zvolené U_{1r} dle nastaveného zesílení. Platí:

$$0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_3 - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{1r} \quad (44)$$

$$\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{1r} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_3 \quad (45)$$

$$\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{1r} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_3 \quad (46)$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{1r} = U_3 \quad (47)$$

Pro hodnoty odporů tedy platí:

$$\frac{U_3}{U_{1r}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (48)$$

Hodnota R_2 se mění podle rozsahu detektoru.

Pokud je R_1 stálé, mění se poměr $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ na každém rozsahu.

Pokud by u každého rozsahu bylo U_{1r} stejné, muselo by se U_3 měnit tak, aby $\frac{U_3}{U_{1r}}$ odpovídalo poměru $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$.

Pokud U_{1r} není stálé a mění se podle rozsahu, musí platit

$$\frac{U_3}{U_{1r}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (49)$$

při určitém nastavení U_3 pro všechny rozsahy. Protože je ale U_{1r} při $B = 0$ na každém rozsahu jiné a nemáme možnost volit pro každý rozsah jiné U_3 , je potřeba tento jev kompenzovat programem v mikrokontroléru, viz proměnná `offsetDC` (str.60) a funkce `calculate` (str.66).

5.4.2 Výpočet hodnot odporů

V kapitole 5.4 bylo uvedeno, že při přepnutí na druhý rozsah 10mT bude napěťová odchylka od výchozího stavu na vstupu zesilovače $\Delta U_1 = 0,13$ V a na výstupu $\Delta U_2 = 1,0$ V. Hodnota odporu R_2 dle obrázku 45 byla stanovena 10 k Ω . Tato hodnota není rozhodující, můžeme zvolit i jinou, ale z důvodu praktičnosti a že se jedná o zaokrouhlenou hodnotu, byla zvolena právě tato. Hodnotu odporu R_1 spočteme dle vztahu:

$$\Delta U_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \Delta U_1 \quad (50)$$

$$\Delta U_2 \cdot R_1 = -R_2 \cdot \Delta U_1 \quad (51)$$

$$R_1 = \left| -\frac{R_2 \cdot \Delta U_1}{\Delta U_2} \right| \quad (52)$$

Po dosazení dostaneme:

$$R_1 = \left| -\frac{10000 \cdot 0,13}{1} \right|$$

$$R_1 = 1300 \Omega$$

Výsledné hodnoty odporů pro jednotlivé rozsahy:

$$R_1 = 1,3 \text{ k}\Omega$$

$$R_{2r1} = 100 \text{ k}\Omega, R_{2r2} = 10 \text{ k}\Omega, R_{2r3} = 1 \text{ k}\Omega$$

Ve schématu 51 jsou tyto odpory označeny jako:

$$R_1 \Rightarrow R_4 + \text{trimr } R_7$$

$$R_{2r1} \Rightarrow R_1$$

$$R_{2r2} \Rightarrow R_2 + \text{trimr } R_{11}$$

$$R_{2r3} \Rightarrow R_3 + \text{trimr } R_8$$

Trimry jsou do obvodu použity z důvodu přesné justáže rozsahů, vyrovnání výrobních tolerancí součástek a sladění průchozích odporů analogových spínačů IC6 pro volbu rozsahu. Trimr R_7

spolu s odporem R_4 slouží k přesnému nastavení hodnoty $1,3\text{ k}\Omega$. Tím se nastaví i správné základní zesílení a z toho důvodu již není potřeba osazovat trimry na všechny rozsahy. Trimr pro nastavení 1. rozsahu byl tedy vynechán.

5.5 Volič rozsahů a DC filtru

Pro změnu rozsahů je potřeba měnit odpor ve zpětné vazbě zesilovače. Toho lze docílit buď mechanickým přepínačem nebo elektronickým analogovým spínačem, viz kapitola 3.3. Zapojení obvodu spínačů v zapojení je na obrázku 51. Řízení spínačů je řešeno mikrořadičem. Elektronický spínač je také použit k sepnutí kapacity C_1 DC filtru ve zpětné vazbě zesilovače. Připojením kondenzátoru zesilovač funguje jako dolní propust. Tímto dojde k zeslabení rušivých signálů při měření DC magnetického pole. Na AC rozsahu je tento kondenzátor odpojen, aby nezkresloval měření.

5.6 TrueRMS konvertor

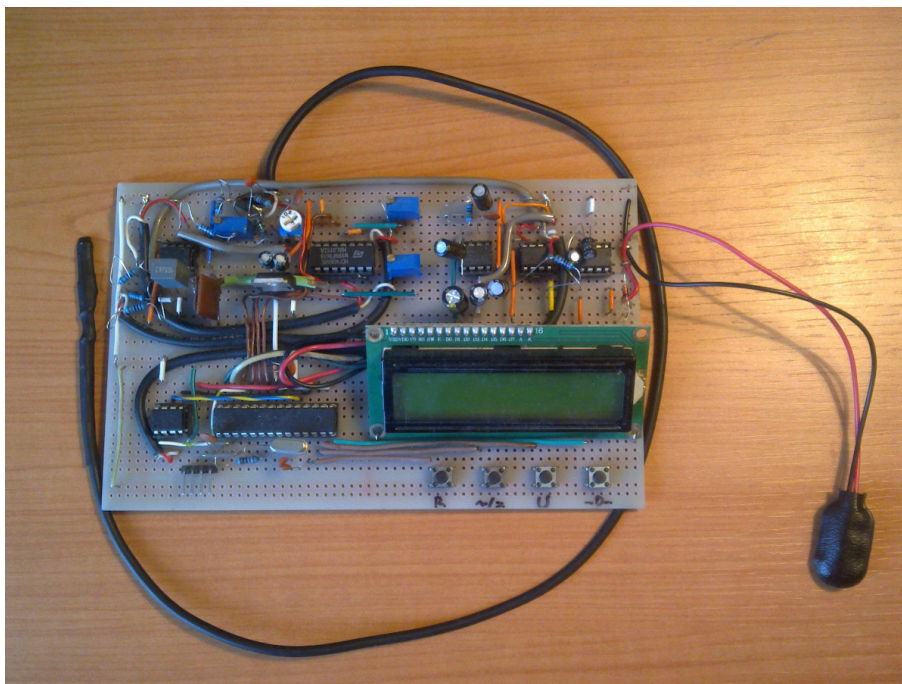
Popisu funkce TrueRMS konvertoru byla věnována kapitola 3.4. U konvertoru bylo použito doporučené zapojení obvodu z datasheetu výrobce [22]. Odpor R_{12} v zapojení zabraňuje samovolného vzniku napětí na vstupu obvodu v případě, pokud přes vazební kapacitou C_{13} neprochází žádný AC signál, protože by se vstup choval jako nezapojený. Kapacita C_{13} je zde kvůli oddělení DC složky $2,5\text{ V}$ z výstupu sledovače, která by byla na vstupu konvertoru nežádoucí. Význam zbývajících součástek je popsán v kapitole 3.4.

5.7 Filtr

Jedná se o jednoduchý RC filtr tvořený z odporu R_{13} a kondenzátoru C_{14} , který stabilizuje náhlé výkyvy napětí před vstupem A/D převodníku při měření stejnosměrného magnetického pole. Hodoty součástek byly zvoleny s ohledem na co nejmenší nežádoucí efekt při měření.

5.8 A/D převodník

A/D převodník byl popsán v kapitole 3.7. Vstupy budou použity v Single-ended módu, tzn. že oba vstupy budou fungovat nezávisle. Na vstup CH0 bude přiveden výstup z filtru pro měření DC magnetického pole, na vstup CH1 přivedeme signál z výstupu TrueRMS konvertoru pro měření AC magnetického pole. Napětí reference je sdruženo s napájecím napětím. Referenci A/D převodníku potřebujeme 5 V (vyšší napětí na vstupech nebude), proto ji zapojíme napájení na 5V napájecí větev. Komunikační piny sběrnice SPI zapojíme viz schéma na obrázku 51 na piny mikrořadiče k tomu výrobcem určené. Zapojení pinu CS pro volbu zařízení slave bude na pinu PB2 mikrořadiče.



Obrázek 46: Realizace zapojení magnetometru

5.9 Mikrořadič

Popisu mikrořadiče byla věnována kapitola 3.6. Jeho zapojení vyžaduje minimum součástek. Odpor R_{14} slouží jako pull-up rezistor na resetovací pin. Kondenzátor C_{19} se využívá k provedení resetu krátkým pulsem (přízemněním), pokud budeme přes rozhraní J_2 nahrávat firmware do paměti mikrořadiče. Dále je k činnosti zapotřebí krystal Q_1 s kapacitami C_{15} a C_{16} . Pracovní frekvence mikrořadiče je dle použitého krystalu 16 MHz.

5.10 Klávesnice

Klávesnice je složena ze čtyř mikrosplínačů o rozměrech 6 x 6 mm a je umístěna pod displejem. Tlačítka jsou připojena na piny mikrořadiče přímo. Při stisku tlačítka se vstupy přizemňují. Pull-up rezistory jsou přímo v mikrořadiči a z tohoto důvodu je není potřeba zapojovat vně na vývody tlačítek.

5.11 Displej

Jako zobrazovač byl využit LCD modul alfanumerický maticový dvojřádkový o 16 znacích na řádek, viz kapitola 3.8. Displej vyžaduje zapojení 4 vodičů a to napájení dva vodiče a komunikační sběrnice I^2C další dva. Expandér IC_{10} je umístěn na samostatné desce pod displejem, viz obrázek 36. Na této desce je také umístěn trimr R_{15} sloužící k nastavení kontrastu displeje a propojky na piny A_0 , A_1 a A_2 k nastavení adresy expandéru. Ta je nastavena dle datasheetu [28] na hodnotu 0x27 hex.

5.12 Praktická realizace zapojení

Obvodové řešení přístroje bylo realizováno na prototypovací desce s pájecími ploškami. Původně zamýšlené nepájivé pole bylo zavrhnuto z důvodu přechodových odporů na kontaktech, což ve značné míře ovlivňovalo měření na testovacím vzorku. Kvůli snížení možného vnějšího rušení jsou signálové cesty vedeny ve stíněných vodičích. Obrázek realizovaného zapojení je na obrázku 46. Na konci černého kabelu je umístěna Hallova sonda.

6 Software mikrořadiče

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.6, je použit jako mikrořadič obvod ATmega328P, který lze programovat v jazyce Wiring, který svou strukturou a syntaxí vychází z jazyka C++. Jako vývojové prostředí bylo použito Arduino IDE 1.8.2. [33]

Kód programu se skládá ze dvou hlavních funkcí, které musí být v programu vždy:

- **setup()** - tato funkce je volána při každém spuštění nebo resetu mikrokontroléru
- **loop()** - tato funkce je vykonávána stále dokola v nekonečné smyčce

6.1 Úvodní část programu

V úvodu programu naimportujeme použité knihovny, které nám v tomto případě usnadní práci se sběrnicemi SPI, I²C a s použitým typem displeje, jak ukazuje výpis 1.

```
#include <SPI.h>                // knihovna pro SPI sběrnici
#include <Wire.h>                // knihovna pro I2C sběrnici
#include <LiquidCrystal_I2C.h>   // knihovna pro displej I2C
```

Výpis 1: Import knihoven

Následuje deklarace globálních proměnných a nastavení potřebných portů pro řízení obvodu analogových spínačů a tlačítek klávesnice.

```
#define CS_ADC 10                // port pro Chip Select pro ADC
#define R1 A0                    // port pro sepnutí 1.rozsahu
#define R2 A1                    // port pro sepnutí 2.rozsahu
#define R3 A2                    // port pro sepnutí 3.rozsahu
#define DC A3                    // port pro sepnutí DC filtru
#define RANGE_BTN 5              // port pro tlačítko rozsahu
#define ACDC_BTN 6               // port pro tlačítko AC/DC
#define UNIT_BTN 7               // port pro tlačítko jednotek
#define ZERO_BTN 8               // port pro nulovací tlačítko
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // nastavení I2C adresy displeje
String unit[] = {"mT","G","kA/m"}; // řetězce pro zobrazení jednotek
float coefficient[] = {1.0,10.0,0.7977};
    // koeficienty na přepočet jednotek mT, G a kA/m

float offsetDC[] = {2.5,2.5,2.5};
    // offset pro nulování pro 1., 2. a 3. DC rozsah
```

```

byte decimals[3][3] = {{1,2,3},           // mT
                      {2,3,4},           // G
                      {1,2,3}};          // kA/m
// nastavení počtu desetinných míst pro jednotky mT, G a kA/m na 1., 2. a
// 3. rozsahu

float valueADC = 0;                      // naměřená hodnota z Hallovy sondy
byte range = 1;                          // nastavený rozsah (1-3)
byte sel_unit = 0;                       // volba jednotek (0-mT, 1-G, 2-kA/m)
bool autoRange = HIGH;                   // režim Autorange
bool isAC = LOW;                         // volba měření AC nebo DC
bool isNegative = LOW;                   // DC hodnota je záporná nebo kladná
bool buttonRange = LOW;                  // stisk tlačítka Změna rozsahu
bool buttonAcDc = LOW;                   // stisk tlačítka AC/DC
bool buttonUnit = LOW;                   // stisk tlačítka Volba jednotek
bool buttonZero = LOW;                   // stisk tlačítka Nulování

```

Výpis 2: Deklarace proměnných

Přidáme speciální znaky do znakové sady znázorňující symboly DC a AC. Ve výpisu 3 je ukázka vytvoření symbolu pro AC rozsah (symbol vlnovky). Rozměr symbolu je 5x8 pixelů. Nula reprezentuje zhasnutý pixel, jednička rozsvícený.

```

uint8_t ac_char[8] = {                  // vytvoření piktogramu pro AC
    0b000000,
    0b000000,
    0b000000,
    0b01010,
    0b10100,
    0b000000,
    0b000000,
    0b000000
};

```

Výpis 3: Nadefinování speciálního znaku pro AC rozsah

6.2 Funkce setup

Zde nadefinujeme část programu, která se provede při spuštění programu. V této části nastavíme vlastnosti všech použitých portů, zda-li budou vstupní nebo výstupní. Atributem INPUT_PULLUP zapneme pull-up rezistory integrované v mikrokontroléru. To nám usnadní připojení tlačítek klávesnice, které tyto pull-up rezistory už nemusí mít připojeny externě. Provede

se inicializace SPI sběrnice a LCD displeje. V poslední fázi přepneme měření na DC a nastavíme 1.rozsah. Zároveň se provede při startu vynulování všech tří rozsahů.

```
void setup()
{
    pinMode(CS_ADC,OUTPUT);
    pinMode(ZERO_BTN,INPUT_PULLUP);           // tlačítko nulovani
    pinMode(RANGE_BTN,INPUT_PULLUP);          // tlačítko rozsahu
    pinMode(ACDC_BTN,INPUT_PULLUP);           // tlačítko ACDC
    pinMode(UNIT_BTN,INPUT_PULLUP);           // tlačítko jednotek
    pinMode(R1,OUTPUT);                        // port pro sepnutí 1. rozsahu
    pinMode(R2,OUTPUT);                        // port pro sepnutí 2. rozsahu
    pinMode(R3,OUTPUT);                        // port pro sepnutí 3. rozsahu
    pinMode(DC,OUTPUT);                       // port pro sepnutí DC filtru

    SPI.begin();                              // inicializace SPI sběrnice
    SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV8);      // nastavení hodin pro SPI

    lcd.init();                               // inicializace displeje
    lcd.createChar(0, dc_char);                // vytvoření piktogramu pro DC
    lcd.createChar(1, ac_char);                // vytvoření piktogramu pro AC

    digitalWrite(DC,HIGH);                    // zapni DC filtr
    digitalWrite(CS_ADC,HIGH);
    // nastav úroveň H na port CS A/D převodníku

    setRange(range);                          // nastav 1. rozsah
    setAllRangeZero();                        // vynuluj všechny DC rozsahy
}
```

Výpis 4: Funkce setup

6.3 Funkce loop

Zde nadefinujeme část programu, která se provádí v nekonečné smyčce. Jedná se o hlavní část programu, která vykonává úkony v tomto pořadí:

1. Načtení hodnoty z A/D převodníku
2. Kontrola na stisk tlačítek
3. Provedení výpočtů
4. Pokud je nastaven režim Autorange, zkontroluje se nastavení vhodného rozsahu
5. Zobrazení údajů na displej

```
void loop()
{
    getValueADC();           // načti hodnotu z A/D převodníku
    checkButtons();          // kontrola na stisk tlačítek
    calculate();              // výpočet hodnot
    checkRange();             // kontrola rozsahu pro Autorange
    printLCD();               // zobrazení dat na displej
    delay(200);               // zpoždění smyčky loop
}
```

Výpis 5: Funkce loop

6.4 Funkce getValueADC

Funkce slouží k načtení hodnoty z A/D převodníku a následně ji přepočte na napětí ve Voltech, které je na jeho vstupu. To se provede tak, že se přijatá hodnota vynásobí maximálním napětím, které může vstup zaznamenat a následně se podělí počtem možných stavů 12-bit A/D převodníku.

```
void getValueADC(){
    valueADC = ReadADC(isAC,CS_ADC);           // načti hodnotu z A/D převodníku
    valueADC = (valueADC*5)/4096;               // přepočet na Volty
}
```

Výpis 6: Funkce getValueADC

6.5 Funkce checkButtons

Funkce slouží ke kontrole stisku tlačítek a provedení potřebných úkonů s tím spojených.

V případě stisku tlačítka pro **nulování rozsahu** se provede vynulování daného rozsahu tím, že se změří aktuální hodnota na A/D převodníku a uloží se do proměnné `offsetDC` pro daný rozsah. Pokud máme zvolený režim Autorange, provede se automaticky vynulování všech rozsahů pomocí funkce `setAllRangeZero()` viz výpis. Část kódu pro nulování rozsahu je ve výpisu 7.

```
buttonZero = digitalRead(ZERO_BTN);    // test na stisk nulování
if (buttonZero == LOW)
{
    if(autoRange) setAllRangeZero();
    // v režimu Autorange vynuluj všechny DC rozsahy
    else offsetDC[range-1] = valueADC;
    // v režimu Manual vynuluj zvolený DC rozsah
}
```

Výpis 7: Část funkce checkButtons pro nulovací tlačítko

Pokud stiskneme tlačítko pro **změnu rozsahu**, dojde cyklicky k nastavení:

1.rozsah → 2.rozsah → 3.rozsah → automat. změna rozsahu (autorange)

Smyčka tvořená příkazem *while* ošetřuje stav, aby po dobu stisknutí tlačítka nedošlo k zacyklení přepínání. Tzn., že k přepnutí rozsahu dojde až po stisku a uvolnění tlačítka. Číslo rozsahu je uloženo v proměnné `range`. Stav proměnné `autoRange` je nastaven na `True`, pokud je režim Autorange zapnut. Část kódu pro nastavení rozsahů je ve výpisu 8.

```
buttonRange = digitalRead(RANGE_BTN);    // test na změnu rozsahu
if (buttonRange == LOW)
{
    while(digitalRead(RANGE_BTN) == LOW);
    if (!autoRange) range++;               // změna rozsahu
    else autoRange = LOW;                 // vypnutí Autorange
    if (range == 4)
    {
        autoRange = HIGH;                 // zapnutí Autorange
        range = 1;
    }
    setRange(range);                      // přepneme rozsah
}
```

Výpis 8: Část funkce checkButtons pro tlačítko změny rozsahu

V případě stisku tlačítka pro **změnu jednotek**, dojde cyklicky k nastavení jednotek:

$$\text{mT} \longrightarrow \text{Gauss} \longrightarrow \text{kA/m}$$

Část kódu pro nastavení rozsahů je ve výpisu 9. Typ zobrazené jednotky se ukládá do proměnné *unit*. Číslo 0 představuje jednotku mT, číslo 1 jednotku Gauss a číslo 2 jednotku kA/m.

```
buttonUnit = digitalRead(UNIT_BTN);    // test na změnu jednotek
if (buttonUnit == LOW)
{
    while(digitalRead(UNIT_BTN) == LOW);
    sel_unit++;
    if (sel_unit == 3) sel_unit = 0;
}
```

Výpis 9: Část funkce checkButtons pro tlačítko změny jednotek

Jestliže stiskneme tlačítko pro změnu měření AC/DC, dojde ke změně stavu proměnné *isAC*. Pokud je hodnota True, máme přístroj nastaven na měření střídavého pole AC a zároveň vypneme DC filtr v zesilovači viz výpis 10.

```
buttonAcDc = digitalRead(ACDC_BTN);    // test na změnu AC/DC
if (buttonAcDc == LOW)
{
    while(digitalRead(ACDC_BTN) == LOW);
    isAC = !(isAC);
    if (isAC)
        digitalWrite(DC,LOW);           // vypni DC filtr
    else
        digitalWrite(DC,HIGH);           // zapni DC filtr
}
```

Výpis 10: Část funkce checkButtons pro tlačítko změnu režimu AC/DC

6.6 Funkce calculate

Jedná se o funkci, která spočítá výslednou hodnotu podle zvoleného rozsahu a jednotek. Pokud měříme DC pole, bere se v úvahu uložená hodnota offsetu (nuly) daného rozsahu. Zároveň se zjišťuje, zda-li je naměřená DC hodnota kladná nebo záporná a tento stav se запиše do proměnné *isNegative*.

```

void calculate(){
    if (isAC == LOW)                // pokud měříme DC rozsah, odečteme offset
    {
        valueADC = (valueADC - offsetDC[range-1]);
    }
    valueADC = valueADC * coefficient[sel_unit]* pow(10,range-1);
        // výpočet hodnoty na základě zvoleného rozsahu a jednotek

    if (valueADC < 0.0) isNegative = HIGH;
        // detekce kladné nebo záporné hodnoty
        else isNegative = LOW;
}

```

Výpis 11: Funkce calculate

6.7 Funkce checkRange

V této funkci se provádí kontrola a nastavení vhodného měřicího rozsahu, pokud je zapnutá funkce Autorange. Jestliže naměřená hodnota překročí 100% rozsahu, nastaví funkce vyšší rozsah. Pokud je naměřená hodnota pod 10% rozsahu, nastaví rozsah nižší. Kód funkce je ve výpisu 11

```

void checkRange(){
    if ((fabs(valueADC) > (0.1 * pow(10,decimals[sel_unit][range-1]))) && (
        autoRange) && (range < 3))
    {
        // pokud je hodnota přes 100% rozsahu, zvýší se rozsah
        range++;
        setRange(range);
    }

    if ((fabs(valueADC) < (0.01 * pow(10,decimals[sel_unit][range-1]))) && (
        autoRange) && (range > 1))
    {
        // pokud je hodnota pod 10% rozsahu, sníží se rozsah
        range--;
        setRange(range);
    }
}

```

Výpis 12: Funkce checkRange

6.8 Funkce print

Funkce slouží k výpisu dat na displej přístroje. Mezi zobrazená data patří:

- režim MANUAL nebo AUTO při vypnuté nebo zapnuté funkci automatické změny měřicího rozsahu (Autorange)
- nastavený rozsah měření včetně zvolených jednotek
- volba měření AC nebo DC pole
- vlastní naměřená hodnota včetně jednotky, popř. zobrazí -OL-, pokud je hodnota přes 100% rozsahu a není zapnutá funkce Autorange

Kód funkce je vypsán ve výpisu 13

```
void printLCD(){
    lcd.setCursor(0,0);
    if (autoRange) lcd.print(" AUTO ");    // zobrazení režimu měření
        else lcd.print("MANUAL");

    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(String(pow(10,decimals[sel_unit][range-1]-1),0) + String(unit[
        sel_unit]) + String(" "));

                                                // zobrazení nastaveného rozsahu

    lcd.setCursor(10,0);                      // zobrazení režimu AC nebo DC
    if (isAC == LOW)
    {
        lcd.write(0); lcd.print("DC");
    }
    else
    {
        lcd.write(1); lcd.print("AC");
    }

    lcd.setCursor ( 8, 1 );                    // znaménko záporné hodnoty
    if(isNegative) lcd.print("-");
        else lcd.print(" ");

    lcd.setCursor ( 9, 1 );
```

```

if (fabs(valueADC) < (0.1 * pow(10,decimals[sel_unit][range-1])))
{
    lcd.print(String(fabs(valueADC),3-decimals[sel_unit][range-1]+1) + String
        (unit[sel_unit]) + String(" "));
}
// zobrazení naměřené hodnoty
else
{
    lcd.print(" -OL- ");
    // pokud je hodnota přes rozsah, zobraz -OL-
}
}

```

Výpis 13: Funkce print

6.9 Funkce readADC

Tato funkce obousměrně komunikuje přímo s A/D převodníkem. Vstupní parametry funkce jsou *CHANNEL* typu bool a *CS* typu int. Pokud má proměnná *CHANNEL* hodnotu False, provede se načtení hodnoty ze vstupu pro AC rozsah, v opačném případě ze vstupu pro DC rozsah. Proměnná *CS* slouží pro číslo portu mikrořadiče, na kterém je připojen vývod CS A/D převodníku. Podrobněji je činnost A/D převodníku popsána v kapitole 3.7 a datasheetu výrobce [26]. Kód funkce je zobrazen ve výpisu 14.

```

int readADC(bool CHANNEL, int CS){
    int msb; int lsb; int commandBytes;
    if (CHANNEL==LOW) commandBytes = B10100000; // načti hodnotu DC
        else commandBytes = B11100000;          // načti hodnotu AC
    digitalWrite(CS, LOW);
        // nastav úroveň L na port CS A/D převodníku
    SPI.transfer (B00000001);                    // odeslání Start bitu
    msb = SPI.transfer(commandBytes);
        // načtení prvních 8-mi bitů z A/D převodníku
    msb = msb & B00001111;
    lsb = SPI.transfer(0x00);
        // načtení zbývajících bitů z A/D převodníku
    digitalWrite(CS, HIGH);
        // nastav úroveň H na port CS A/D převodníku
    return ((int) msb) <<8 | lsb;                  // zpracování dat a převod na DEC
}

```

Výpis 14: Funkce readADC

Pomocí proměnné *commandBytes* se odesílá požadavek ke čtení vstupů do převodníku. Pokud je první bit zleva nastaven na 1, budou se oba vstupy číst v single-ended módu, hodnota 0 je nastaví do pseudo-diferenčního módu. Druhý bit zleva nastavuje vstup, ze kterého se bude číst. Jestliže je nastaven na 0, bude se číst napěťová úroveň ze vstupu CH0, při hodnotě 1 se přečte ze vstupu CH1. Třetí bit zleva zvolí režim přenosu dat z převodníku. Pokud je hodnota 0, budou přenášeny nejprve LSB bity, při hodnotě 1 nejprve MSB bity. Zbývajících 5 bitů se nevyužívá. [26]

6.10 Funkce `setAllRangeZero`

Pomocí této funkce se provádí automatické nulování všech tří rozsahů. To se provede postupným změřením aktuální hodnoty na A/D převodníku na každém rozsahu a uložením do proměnné *offsetDC* pro daný rozsah. Kód funkce je ve výpisu 15.

```
void setAllRangeZero(){
    byte i;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(4,0);
    lcd.print("NULOVANI");
    for(i=1; i<4; i++)
    {
        setRange(i);
        lcd.setCursor(7,1);
        lcd.print(i);
        delay(1000);
        getValueADC();
        offsetDC[i-1] = valueADC;
    }
    setRange(range);
    lcd.clear();
}
```

Výpis 15: Funkce `setAllRangeZero`

6.11 Funkce `setRange`

Funkce provádí nastavení logických úrovní patřičných portů mikrořadiče k nastavení požadovaného rozsahu pomocí analogových CMOS spínačů. Funkce má jeden vstupní parametr *R* typu byte. Hodnota 1 nastaví 1.rozsah, hodnota 2 2.rozsah a hodnota 3 3.rozsah. Kód funkce je ve výpisu 16.

```
void setRange(byte R){
  switch (R)
  {
    case 1:                // rozsah 1
    {
      digitalWrite(R1,HIGH);
      digitalWrite(R2,LOW);
      digitalWrite(R3,LOW);
      break;
    }
    case 2:                // rozsah 2
    {
      digitalWrite(R1,LOW);
      digitalWrite(R2,HIGH);
      digitalWrite(R3,LOW);
      break;
    }
    case 3:                // rozsah 3
    {
      digitalWrite(R1,LOW);
      digitalWrite(R2,LOW);
      digitalWrite(R3,HIGH);
      break;
    }
  }
}
```

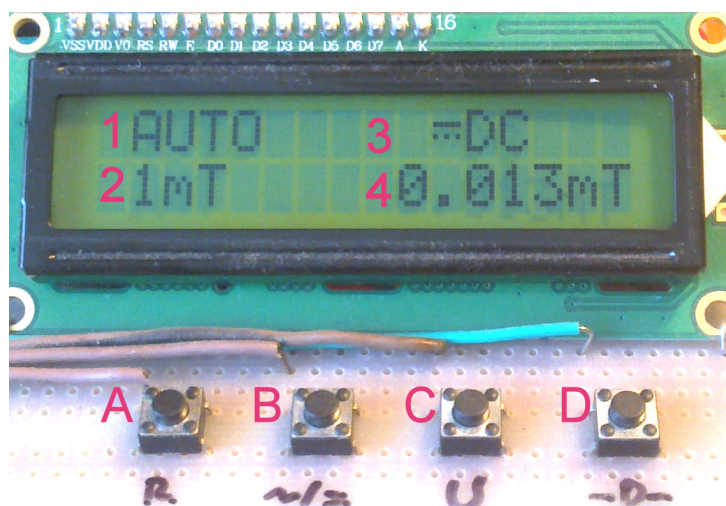
Výpis 16: Funkce setRange

7 Návod k obsluze

Obsluha přístroje je realizována pomocí čtyř tlačítek, které se nachází pod displejem. Detailní fotografie tlačítek a displeje je na obrázku 47. Zleva doprava se jedná o tlačítka:

- tlač.A **Změna rozsahu** - „R“
- tlač.B **Přepínání AC/DC** - „~/=“
- tlač.C **Změna jednotek** - „U“
- tlač.D **Nulování rozsahu** - „-0-“

Po zapnutí přístroje se na displeji objeví text „NULOVANI“, pod nímž se objevuje číslo rozsahu, který se právě nuluje. Po vynulování všech rozsahů se na displeji zobrazí údaje, viz obrázek 47.



Obrázek 47: Zobrazení údajů na displeji přístroje

Údaj č.1 zobrazuje zvolený režim změny měřících rozsahů. Je zde buď AUTO pro automatickou volbu (Autorange) nebo MANUAL pro ruční volbu.

Údaj č.2 zobrazuje aktuální měřící rozsah i se zvolenými jednotkami.

Údaj č.3 zobrazuje DC pro měření stejnosměrného pole, nebo AC pro střídavé.

Údaj č.4 zobrazuje aktuální naměřenou hodnotu včetně zvolené jednotky.

Volba měřícího rozsahu

Stisknutím tlačítka A měníme nastavení rozsahu měření, popř. zvolíme režim Autorange. Pokud mačkáme tlačítko, dochází cyklicky k přepínání:

1.rozsah \rightarrow 2.rozsah \rightarrow 3.rozsah \rightarrow automat. změna rozsahu (autorange)

V režimu Autorange dojde při překročení 100% rozsahu měřené hodnoty k nastavení vyššího rozsahu. Pokud hodnota klesne pod 10% rozsahu, dojde k nastavení rozsahu nižšího.

Volba režimu AC/DC

Přepínání režimu měření stejnosměrného DC nebo střídavého pole AC lze provést tlačítkem B. Na displeji se zvolený režim zobrazí jako údaj č.3, viz obrázek 47.

Volba zobrazených jednotek

Přístroj umožňuje volbu tří měřených veličin magnetického pole. Stiskem tlačítka C provedeme volbu požadované jednotky. Stiskem tlačítka dojde cyklicky k volbě jednotek:

$$\mathbf{mT} \text{ (militesla)} \longrightarrow \mathbf{G} \text{ (Gauss)} \longrightarrow \mathbf{kA/m} \text{ (kiloampér na metr)}$$

Zvolená jednotka se zobrazí za číselným údajem č.2 a č.4, viz obrázek 47.

Nulování rozsahu

Nulování rozsahu se provádí stiskem tlačítka D. Nulování by se mělo provádět s Hallovou sondou umístěnou v nulovací komůrce. Ta je tvořena kovovou trubičkou, která odstíní vnější magnetické pole. Pokud máme přístroj přepnutý na manuální volbu rozsahů (na displeji svítí MANUAL), vynulujeme jen daný rozsah. Pokud je přístroj nastaven na automatickou volbu rozsahů (na displeji svítí AUTO), dojde k vynulování všech rozsahů.

8 Seřízení a kalibrace na etalonu

Přístroj je pro přesné seřízení měřících rozsahů vybaven těmito trimry:

- R_7 - celkové zesílení
- R_8 - zesílení 2. rozsah
- R_{11} - zesílení 3. rozsah

Seřízení a následná kalibrace byla provedena na kalibrační Helmholtzově cívce a jhu v akreditované kalibrační laboratoři firmy PTS Josef Solnař v Ostravě. Tato laboratoř se zabývá kalibrací přístrojů pro nedestruktivní testování materiálů. Mimo jiné provádí kalibrace magnetometrů akreditovaně i bez akreditace.

Zmíněná Helmholtzova cívka se používá ke generování konstantního homogenního DC magnetického pole nebo AC magnetického pole o frekvenci 50 Hz. Je tvořena dvěma cívkami umístěných vedle sebe, jejichž vinutí je zapojeno do série. Při vlastní kalibraci magnetometrů se měří stejnosměrný nebo střídavý proud napájející Helmholtzovy cívky kalibrovaným měřicím přístrojem, který slouží jako etalon proudu. Na základě změřeného proudu se určí intenzita magnetického pole generované cívkami.

Elektromagnetické jho se taktéž využívá ke generování konstantního homogenního DC nebo AC magnetického pole. Obsahuje ale jen jednu cívku, ve které je vloženo feromagnetické jádro ve tvaru C. V malé vzduchové mezeře jádra je pak umístěn prostor pro vložení Hallovy sondy. Výhodou jha je vyšší intenzita magnetického pole při nižším proudu. Za nevýhodu lze považovat určitý zbytkový (remanentní) magnetismus feromagnetického jádra, se kterým je nutno při měření počítat.

Schéma zapojení kalibračního obvodu je na obrázku 48.

8.1 Použité přístroje

Regulovatelný stabilizovaný zdroj stejnosměrného proudu

Typ GW INSTEK PSM-6003, programovatelný DC zdroj. Slouží pro DC napájení Helmholtzovy cívky (jha).

Regulovatelný stabilizovaný zdroj střídavého proudu

Typ AC Power Source LSP-1KVAR, programovatelný AC zdroj. Slouží pro AC napájení Helmholtzovy cívky (jha).

Digitální multimetr

Typ RIGOL DM 3058E. Slouží k měření DC a AC proudu.

Cívkový etalon magnetické indukce

Cívkový etalon magnetické indukce typu Helmholtz. Slouží pro buzení homogenního magnetického pole.

Etalon magnetické indukce

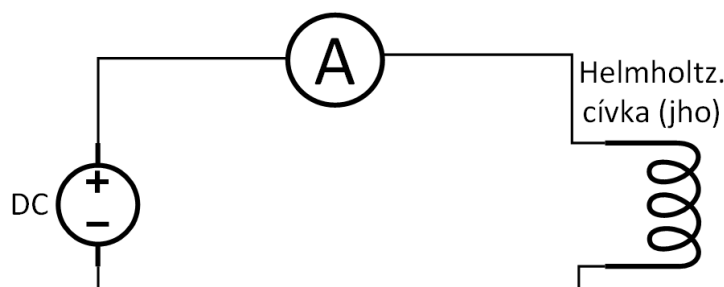
Etalon magnetické indukce typu Jho. Slouží pro buzení homogenního magnetického pole.

8.2 Návaznost měřidel

Všechny etalony a měřidla jsou navázány nepřerušným řetězcem na primární etalony prostřednictvím akreditovaných kalibračních laboratoří případně přímo prostřednictvím kalibračních laboratoří na ČMI (Český metrologický institut).

8.3 Schéma zapojení kalibračního obvodu

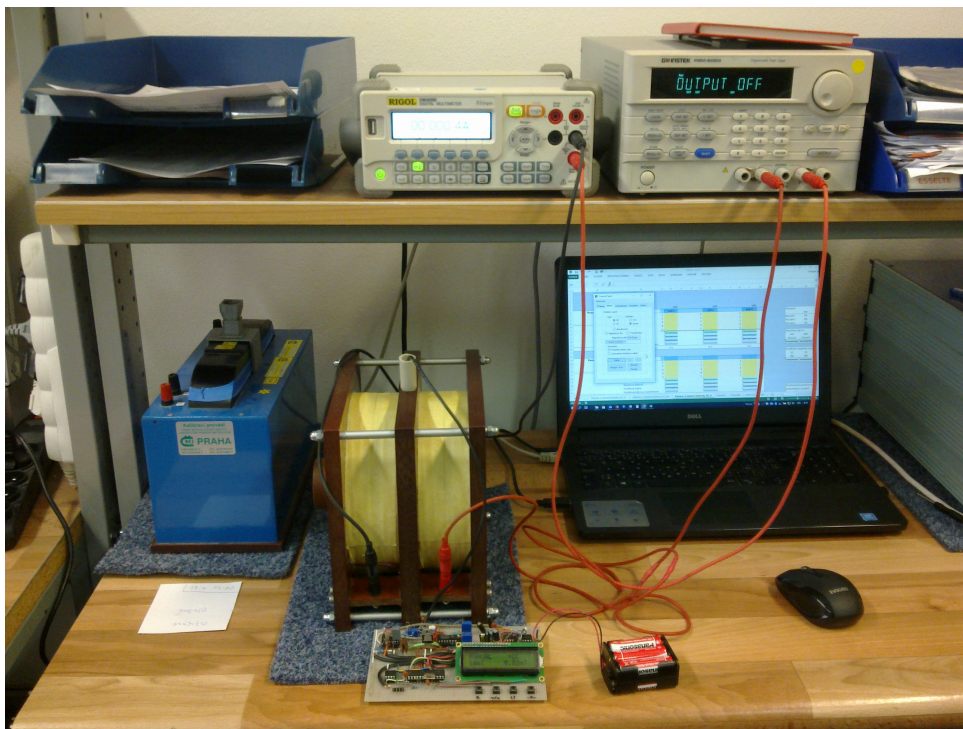
Schéma zapojení pro generování DC magnetického pole je na obrázku 48.



Obrázek 48: Schéma zapojení pro generování DC magnetického pole

8.4 Postup seřízení

Helmholtzova cívka nebo jho se zapojí do obvodu regulovatelného stabilizovaného stejnosměrného nebo střídavého zdroje proudu. Do obvodu se zapojí přesný kalibrační ampérmetr. Měřící sonda magnetometru se umístí do prostoru kalibračního pole mezi obě cívky a její poloha se zafixuje tak, aby se směr siločar shodoval se specifikací výrobce. Přístroj zapneme a trimrem R_9 nastavíme na obvodu IC2 na pinu č.3 napětí 2,5 V. Provedeme korekci nuly stiskem nulovacího tlačítka D, viz obrázek 47 (kompenzace zemského magnetického pole). Poté nastavíme proud v obvodu na stanovenou hodnotu, odpovídající požadované velikosti intenzity magnetického pole. Z magnetometru odečteme naměřenou hodnotu. Pokud je potřeba, nastavíme správnou hodnotu příslušným trimrem R_7 , R_8 nebo R_{11} v závislosti na měřeném rozsahu. Na každém rozsahu se kontrola provede ve třech bodech. Před měřením jednotlivých měřících bodů vždy zkontrolujeme vypnutí proudu do cívek správnost nastavení nuly. Na DC rozsazích ještě vyzkoušíme přepolování cívek (J_{ha}) a zkontrolujeme správnost údajů i ve druhé polaritě magnetického pole. Fotografie z průběhu seřizování a následné kalibrace na Helmholtzově cívce je na obrázku 49.



Obrázek 49: Fotografie z průběhu seřizování a kalibrace

8.5 Postup kalibrace

Cílem kalibrace přístroje je stanovit odchylku hodnoty intenzity magnetického pole indikované kalibrovaným přístrojem od hodnoty intenzity konstantního homogenního magnetického pole generovaného Helmholtzovými cívkami (jhem) napájenými stejnosměrným proudem z DC zdroje nebo střídavým proudem z AC zdroje.

Helmholtzova cívka nebo jho se zapojí do obvodu regulovatelného stabilizovaného stejnosměrného nebo střídavého zdroje proudu. Do obvodu se zapojí přesný kalibrační ampérmetr. Měřicí sonda magnetometru se umístí do prostoru kalibračního pole mezi obě cívky a její poloha se zafixuje tak, aby se směr siločar shodoval se specifikací výrobce. Na každém rozsahu se stanoví nejméně tři hodnoty intenzity kalibračních bodů. Nastavíme proud v obvodu na stanovenou hodnotu, odpovídající požadované velikosti intenzity magnetického pole. Z kalibrovaného přístroje se odečte naměřená hodnota. Před měřením jednotlivých měřících bodů vždy zkontrolujeme vypnutím proudu do cívek správnost nastavení nuly. Stejným způsobem se pokračuje, až se získá deset hodnot změřeného proudu v každém bodě kalibrace v případě DC rozsahu (pět hodnot při každé polaritě) nebo pět hodnot v případě AC rozsahu. Stejným způsobem se postupuje při ostatních stanovených hodnotách na všech kalibrovaných rozsazích. Tento postup vyplývá přímo z kalibračního postupu kalibrační laboratoře.

Jako etalon magnetické indukce byla použita převážně Helmholtzova cívka, jen u hodnot 80,0 mT DC a dále 50,0 mT a 80,0 mT AC bylo použito jho kvůli proudovým limitům zdrojů.

8.6 Záznam o měření

V tabulkách níže jsou zaznamenány naměřené hodnoty na všech rozsazích ve třech bodech rozsahu. U DC rozsahů se provedlo měření 5x v jedné polaritě magnetického pole a 5x ve druhé polaritě. Hodnota nastavené indukce na etalonu je označena jako B_E a naměřené hodnoty testovaným přístrojem jako B_T .

1.rozsah 0 - 1 mT DC

B_E [mT]	B_T [mT]									
0,200	0,193	0,203	0,197	0,195	0,201	-0,195	-0,204	-0,200	-0,206	-0,195
0,500	0,502	0,505	0,503	0,499	0,508	-0,503	-0,499	-0,504	-0,508	-0,499
0,800	0,808	0,806	0,812	0,807	0,802	-0,807	-0,804	-0,797	-0,800	-0,807

2.rozsah 1 - 10 mT DC

B_E [mT]	B_T [mT]									
2,00	1,99	1,99	2,00	1,99	1,99	-2,01	-2,01	-2,00	-2,01	-2,00
5,00	4,97	4,97	4,98	4,97	4,98	-4,98	-4,99	-4,98	-4,99	-4,98
8,00	7,98	7,96	7,98	7,96	7,98	-7,95	-7,95	-7,96	-7,95	-7,97

3.rozsah 10 - 100 mT DC

B_E [mT]	B_T [mT]									
20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0
50,0	49,7	49,7	49,7	49,7	49,7	-50,5	-50,5	-50,5	-50,5	-50,5
80,0	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	-81,1	-81,1	-81,2	-81,1	-81,2

1.rozsah 0 - 1 mT AC

B_E [mT]	B_T [mT]				
0,200	0,201	0,201	0,203	0,201	0,203
0,500	0,503	0,503	0,502	0,503	0,503
0,800	0,800	0,802	0,801	0,801	0,802

2.rozsah 1 - 10 mT AC

B_E [mT]	B_T [mT]				
2,00	1,99	1,98	1,99	1,99	1,99
5,00	4,96	4,96	4,97	4,96	4,96
8,00	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90

3.rozsah 10 - 100 mT AC

B_E [mT]	B_T [mT]				
20,0	20,0	19,8	19,9	20,0	19,9
50,0	49,6	49,5	49,6	49,5	49,6
80,0	78,9	79,0	78,9	78,9	79,0

8.7 Vyhodnocení výsledků kalibrace

8.7.1 Přesnost měření

Výsledek měření je hodnota měřené veličiny získaná měřením. Výsledek měření by měl obsahovat i vyhodnocení přesnosti měření. Přesnost měření vyjadřuje těsnost shody mezi výsledkem měření a pravou hodnotou měřené veličiny. Zároveň udává rozdíl mezi výsledkem měření a pravou hodnotou měřené veličiny. Pravá hodnota charakterizuje veličinu definovanou za podmínek existujících v daném okamžiku. [34]

8.7.2 Výsledky kalibrace

Výsledek kalibrace s vyjádřením relativní chyby testovaného přístroje δ_T , směrodatné odchylky σ_T a relativní odchylky přístroje vůči etalonu σ je uveden v následujících tabulkách. Údaj střední hodnoty \bar{B}_T vychází z naměřených hodnot z tabulek v kapitole 8.6 dle vztahu (54) a byl zaokrouhlen na tři platné cifry. Směrodatná odchylka σ_T vychází ze vztahu (55) a relativní chyba testovaného přístroje δ_T ze vztahu (56). Relativní chyba testovaného přístroje vůči etalonu δ se vypočítá pomocí vztahu:

$$\delta = \frac{B_E - \bar{B}_T}{\bar{B}_T} \cdot 100\% \quad (53)$$

1.rozsah 0 - 1 mT DC

B_E [mT]	0,200	0,500	0,800	-0,200	-0,500	-0,800
\bar{B}_T [mT]	0,198	0,503	0,807	-0,200	-0,503	-0,803
σ_T	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$
δ_T [%]	1,97	0,63	0,42	2,38	0,71	0,52
δ [%]	1,1	0,68	0,87	0,00	0,52	0,37

2.rozsah 1 - 10 mT DC

B_E [mT]	2,00	5,00	8,00	-2,00	-5,00	-8,00
\bar{B}_T [mT]	1,99	4,97	7,97	-2,01	-4,98	-7,96
σ_T	$4,22 \cdot 10^{-3}$	$5,48 \cdot 10^{-3}$	0,0110	$5,47 \cdot 10^{-3}$	$5,48 \cdot 10^{-3}$	$8,94 \cdot 10^{-3}$
δ_T [%]	0,21	0,11	0,14	0,27	0,11	0,11
δ [%]	0,40	0,52	0,35	0,30	0,32	0,55

3.rozsah 10 - 100 mT DC

B_E [mT]	20,0	50,0	80,0	-20,0	-50,0	-80,0
\bar{B}_T [mT]	20,0	49,7	79,2	-20,0	-50,5	-81,1
σ_T	0	0	0	0	0	0,0447
δ_T [%]	0	0	0	0	0	0,06
δ [%]	0,00	0,60	1,00	0,00	1,00	1,40

1.rozsah 0 - 1 mT AC

B_E [mT]	0,200	0,500	0,800
\overline{B}_T [mT]	0,202	0,503	0,801
σ_T	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$4,47 \cdot 10^{-4}$	$8,37 \cdot 10^{-4}$
δ_T [%]	0,54	0,89	0,10
δ [%]	0,90	0,58	0,15

2.rozsah 1 - 10 mT AC

B_E [mT]	2,00	5,00	8,00
\overline{B}_T [mT]	1,99	4,96	7,90
σ_T	$4,47 \cdot 10^{-3}$	$4,47 \cdot 10^{-3}$	0
δ_T [%]	0,22	0,09	0
δ [%]	0,60	0,76	1,3

3.rozsah 10 - 100 mT AC

B_E [mT]	20,0	50,0	80,0
\overline{B}_T [mT]	19,9	49,6	78,9
σ_T	0,0837	0,0548	0,0548
δ_T [%]	0,42	0,11	0,07
δ [%]	0,40	0,88	1,3

9 Porovnání vlastností přístroje s komerční sondou

Dle zadání práce bylo provedeno porovnávací měření s komerční sondou typ VERNIER MAGNETIC FIELD, viz obrázek 50.



Obrázek 50: Sonda VERNIER MAGNETIC FIELD

9.1 Popis komerční sondy

Jedná se o měřicí přístroj, který obsahuje měřicí sondu a jednotku s elektronikou, která je se sondou spojena kabelem. Vlastní měření a odečítání hodnot se provádí pomocí dodané SW aplikace na PC, se kterým je zařízení propojeno přes USB kabel. Přímo na sondě je mechanický volič jednoho ze dvou rozsahů $\pm 0,32$ mT nebo $\pm 6,4$ mT. K měření magnetického pole se využívá Hallův senzor [35].

9.2 Postup měření

Porovnávací měření bylo provedeno v magnetickém poli složeného ze dvou permanentních magnetů položených vedle sebe tak, aby magnety měly proti sobě opačné póly a tím vytvořily mezi sebou magnetické pole, jehož indukční čáry procházely z jednoho magnetu do druhého. Na prvním měřicím rozsahu testovaného přístroje byly stanoveny tři měřicí body, na druhém pouze dva z důvodu omezeného měřicího rozsahu komerční sondy. Třetí rozsah a AC rozsahy měřeny nebyly. Pro každou hodnotu byla nejprve nastavena vzájemná vhodná poloha magnetů s ohledem na velikost indukce v měřicím bodě pro daný rozsah a uprostřed mezi póly byla změřena komerční sondou hodnota B_K . Následně bylo změřeno 10 hodnot v témže místě testovaným přístrojem označených jako B_{T1} až B_{T10} . Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulkách viz kapitola 9.3.

9.3 Záznam o měření

1.rozsah 0 - 1 mT DC

B _K [mT]	B _T [mT]									
0,300	0,255	0,260	0,258	0,245	0,255	0,258	0,254	0,248	0,250	0,249
0,491	0,443	0,435	0,446	0,450	0,458	0,436	0,466	0,455	0,459	0,459
0,788	0,703	0,709	0,705	0,713	0,724	0,753	0,739	0,734	0,752	0,734

2.rozsah 1 - 10 mT DC

B _K [mT]	B _T [mT]									
2,04	1,92	1,86	1,77	1,79	1,82	1,83	1,97	1,88	1,78	1,79
4,98	4,28	3,75	4,53	4,28	4,50	4,35	4,32	4,28	4,47	4,39

9.4 Vyhodnocení měření

Výsledek porovnávacího měření s vyjádřením relativní chyby je uveden v následujících tabulkách. Údaj naměřené hodnoty \bar{B}_T vychází ze střední hodnoty naměřených hodnot B_T ze záznamu o měření viz kapitola 9.3. Střední hodnotu \bar{B}_T vypočteme podle vztahu [34]:

$$\bar{B}_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{Ti} \quad (54)$$

kde n je počet měření, v tomto případě 10. Následně spočteme směrodatnou odchylku testovaného přístroje σ_T [34]:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (B_{Ti} - \bar{B}_T)^2} \quad (55)$$

Dále vypočteme relativní chybu testovaného přístroje δ_T .

$$\delta_T = \frac{\sigma}{\bar{B}_T} \cdot 100\% \quad (56)$$

Na závěr spočítáme relativní chybu testovaného přístroje vůči komerční sondě:

$$\delta = \frac{B_K - \bar{B}_T}{\bar{B}_T} \cdot 100\% \quad (57)$$

1.rozsah 0 - 1 mT DC

B_K [mT]	0,300	0,491	0,788
\bar{B}_T [mT]	0,2532	0,4507	0,7266
σ_T	$4,96208 \cdot 10^{-3}$	0,010478	0,018650
δ_T [%]	1,96	2,33	2,57
δ [%]	18,5	8,94	8,45

2.rozsah 1 - 10 mT DC

B_K [mT]	2,04	4,98
\bar{B}_T [mT]	1,841	4,315
σ_T	0,066072	0,21966
δ_T [%]	3,59	5,09
δ [%]	10,8	15,4

Dle výsledků je patrné, že došlo při porovnávacím měření k poměrně velké chybě. To může být způsobeno těmito vlivy:

1. Nehomogenitou magnetického pole permanentních magnetů způsobenou zakřivenými magnetickými siločarami.
2. Nebylo použito stínění proti účinkům magnetického pole Země, což mohlo zkreslovat naměřenou hodnotu hlavně na nízkých hodnotách.
3. V dokumentaci komerční sondy není uvedeno přesné umístění elementu Hallovy sondy v pouzdře.
4. Nebyla k dispozici dokumentace ohledně kalibrace komerční sondy, díky čemuž není možno zjistit informace o její přesnosti.

9.5 Grafické znázornění linearity

Graf na obrázku 52 znázorňuje linearitu Hallovy sondy. Tato vlastnost je popsána i datasheetu [12]. V grafu jsou znázorněny tři body, které byly zvoleny na 1. rozsahu. Modré body znázorňují naměřené hodnoty při kalibraci na etalonu, viz kapitola 8.7.2. Červené vyjadřují hodnoty změřené při porovnávacím měření s komerční sondou, viz kapitola 9.4. K potvrzení linearity byly body proloženy lineární regresní křivkou. Pro její vytvoření bylo nutno určit hodnoty SLOPE a INTERCEPT. Hodnota SLOPE vyjadřuje směrnici regresní přímky, INTERCEPT vyjadřuje souřadnice bodu, který protíná osu Y pro $X = 0$.

Pro výpočet SLOPE a INTERCEPT byl použit Microsoft Excel, který umí tyto hodnoty spočítat.

Pro regresní křivku linearizující graf výsledků měření na etalonu jsou hodnoty následující:

$$\text{SLOPE} = 1,015 \quad \text{INTERCEPT} = -0,004833$$

Pro regresní křivku linearizující graf výsledků měření s komerční sondou vyšly hodnoty takto:

$$\text{SLOPE} = 0,9677 \quad \text{INTERCEPT} = -0,03231$$

V grafu je patrné, že naměřené hodnoty porovnávacího měření s komerční sondou nejsou zcela v lineárním průběhu (střední měřící body neprocházejí regresní křivkou). Důvody této nelinearity jsou popsány v kapitole 9.4.

Závěr

Zadání diplomové práce bylo splněno.

V teoretickém úvodu jsem se věnoval popisu magnetického pole a o možnostech jeho měření pomocí několika typů senzorů. Dále byly rozebrány jednotlivé komponenty v zapojení a důvody jejich použití. V praktické části mé práce byl proveden návrh vlastního zapojení včetně výpočtu potřebných hodnot součástek. Následně byla popsána činnost řídicího kódu procesoru. Pro přesné seřízení přístroje byl použit etalon magnetického pole, což bylo podrobně popsáno a následně i vyhodnoceno. Na závěr bylo provedeno porovnávací měření s komerční sondou se zdůvodněním výsledků.

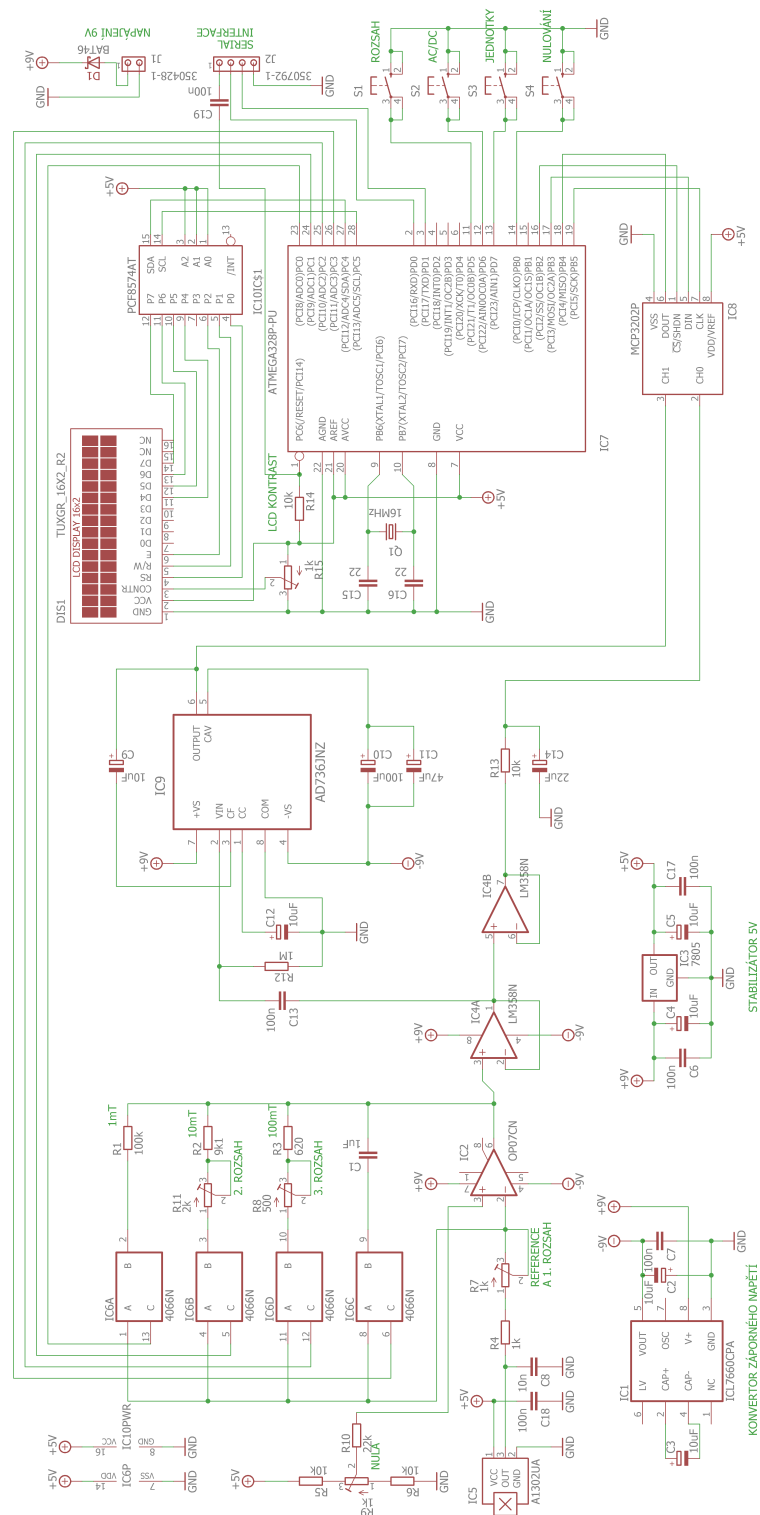
Literatura

- [1] Magnetické pole, *Střední škola automobilní Ústí nad Orlicí* Automatizace.hw.cz. Dostupné z: http://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2017/05/Magneticke_pole.pdf
- [2] MALÝ, Marek. Magnetické pole, *Přírodovědecká fakulta UJEP - katedra fyziky*, [online]. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~mmaly/vyuka/ruzne/ISING/Ising/05_Magneticke_pole.pdf
- [3] ŠIMBERSKÝ, Michal. Měření magnetického pole, *Bakalářská práce. VUT Brno - fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií*, 2012.
- [4] VOJÁČEK, Antonín. Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip *Automatizace.hw.cz*, [online]. 2007 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>
- [5] MORAVEC, Zdeněk. Hallova sonda *Web o chemii, elektronice a programování*, [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <http://z-moravec.net/elektronika/cidlasensory/hallova-sonda/>
- [6] VOJÁČEK, Antonín. Integrované AMR senzory magnetického pole *Automatizace.hw.cz*, [online]. 2007 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetického-pole>
- [7] VOJÁČEK, Antonín. GMR senzory mag. pole - 1. díl - princip a struktura *Automatizace.hw.cz*, [online]. 2007 [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/gmr-senzory-mag-pole-1-dil-princip-a-struktura>
- [8] VOJÁČEK, Antonín. TMR – Tunelová magnetoresistence – 1. díl - princip *Automatizace.hw.cz*, [online]. 2007 [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/tmr-tunelova-magnetoresistence-1-dil-princip>
- [9] SQUID. *Wikipedie* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/SQUID>
- [10] Wheatstonův můstek, *raketky.x2u.cz*, [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://raketky.x2u.cz/redals/snimac/index.htm>
- [11] Můstkové metody, *Západočeská univerzita v Plzni - fakulta strojní*, [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/VYUKA/Data1/MT/mt-prednasky/K02mustek.pdf>
- [12] Technical documentation. *Allegro Microsystems* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/allegro-microsystems/a1301-a1302/7340-165900.html>

- [13] Operační zesilovač. *Střední škola elektrotechnická a strojírenská*[online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: https://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ea/oz.pdf
- [14] Zesilovače biologických signálů *ČVUT - katedra teorie obvodů*[online]. [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: http://noel.feld.cvut.cz/vyu/x31zle/Lectures/04_Zesilovac.pdf
- [15] Neinvertující zapojení operačního zesilovače *ELUC - elektronická učebnice*[online]. [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/690>
- [16] Invertující zapojení operačního zesilovače *ELUC - elektronická učebnice*[online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/689>
- [17] RONEŠOVÁ, Andrea. Měření statických parametrů operačních zesilovačů. *Západočeská univerzita v Plzni - fakulta strojní*, [online]. [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: https://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=aes_mso
- [18] OP07C Datasheet *Texas Instruments*[online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/op07c.pdf>
- [19] LM358 Datasheet *Texas Instruments*[online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>
- [20] LM358 *Wikipedia*[online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/LM358>
- [21] 4066B Datasheet *Texas Instruments*[online]. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <http://www.tij.co.jp/product/jp/CD4066B>
- [22] AD736 Datasheet *Analog Devices*[online]. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad736.pdf>
- [23] ICL7660 Datasheet *Renesas*[online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/datasheet/icl7660.pdf>
- [24] HUMLHANS, Jan. *Nábojové pumpy: funkce, přehled a použití. [1. díl]*. Praha: BEN - technická literatura, 2002.. [cit. 2019-02-03]. ISBN 80-7300-046-6.
- [25] ATmega328P Datasheet *Microchip*[online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [26] MCP3202 Datasheet *Microchip*[online]. [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21034d.pdf>

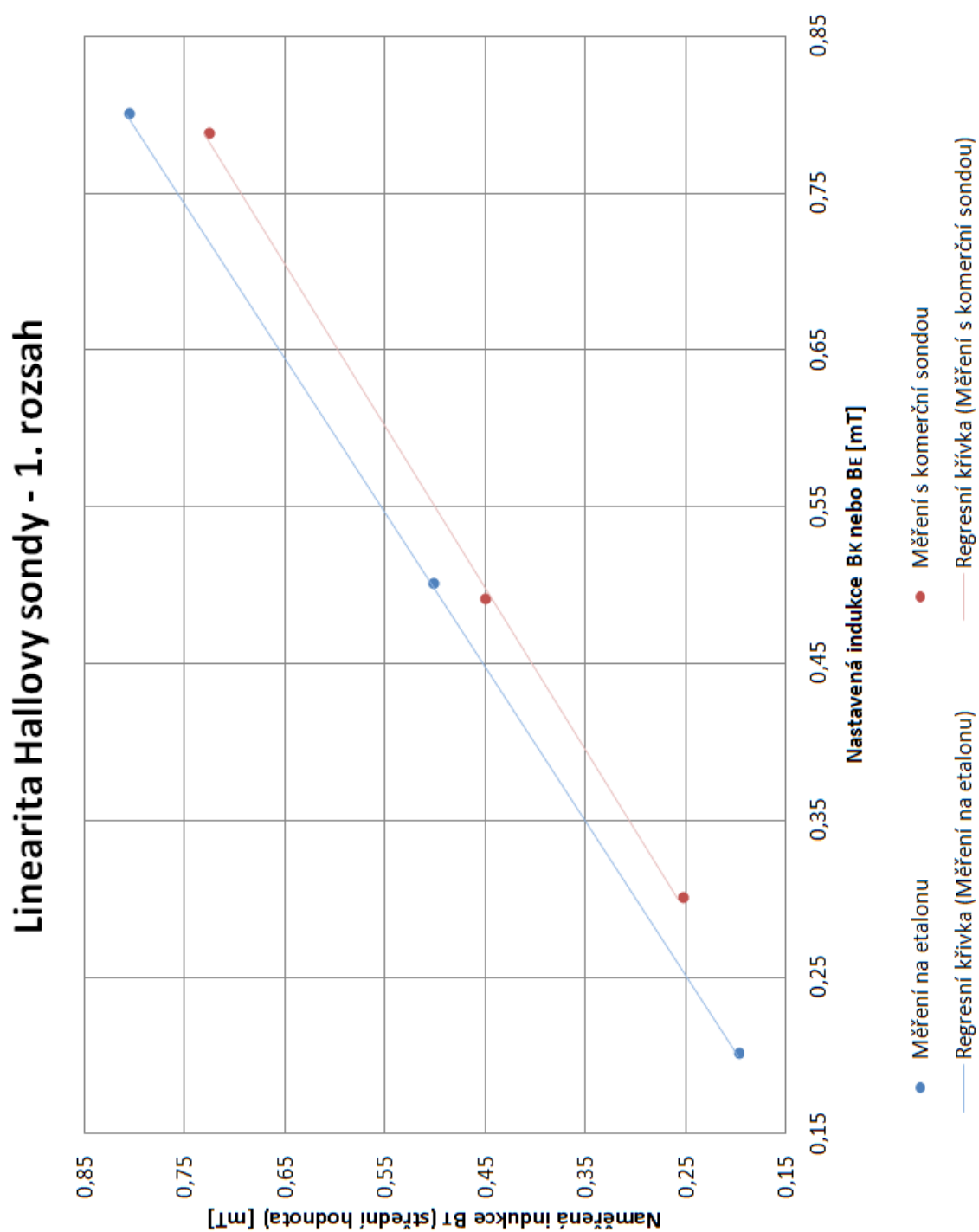
- [27] LCD 16x2 Datasheet *SHENZHEN EONE ELECTRONICS CO.,LTD*[online]. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/0B4B30jzMyzG8U1p10DBfbWRUWGc/view>
- [28] PCF8574 Datasheet *Texas Instruments*[online]. [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/pcf8574>
- [29] BAT46 Datasheet *Vishay*[online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/85662/bat46.pdf>
- [30] Externí sériové sběrnice SPI a I²C *Root.cz*, [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>
- [31] Komunikace po sériové sběrnici I²C *Root.cz*, [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/komunikace-po-seriove-sbornici-isup2supc/>
- [32] Krátký průvodce I²C (TWI, wire) sběrnici *Arduino návody*, [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/technikuv-blog/zjisteni-adresy-i2c-twi-wire-zarizeni.html>
- [33] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*, [cit. 2019-03-24]. Bučovice: Martin Stríž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [34] FAJT, Václav, Vladimír HAASZ a Miloš SEDLÁČEK. Elektrická měření. *České vysoké učení technické*. [cit. 2019-03-31], 1992. ISBN 80-01-00751-0.
- [35] VERNIER MAGNETIC FIELD SENSOR. Manual and specification. *Vernier*[online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.vernier.com/files/manuals/mg-bta/mg-bta.pdf>

A Schéma zapojení detektoru



Obrázek 51: Schéma zapojení detektoru

B Graf linearity Hallovy sondy



Obrázek 52: Linearita Hallovy sondy

C Seznam použitých součástek

Označení	Název / hodnota	Označení	Název / hodnota
R ₁	100 kΩ	Q ₁	krystal 16 MHz
R ₂	9,1 kΩ	D ₁	BAT46
R ₃	620 Ω	IC1	ICL7660CPA
R ₄	1 kΩ	IC2	OP07CP
R ₅ , R ₆ , R ₁₃ , R ₁₄	10 kΩ	IC3	L7805
R ₇ , R ₉	trimr 1 kΩ	IC4	LM358N
R ₈	trimr 500 Ω	IC5	A1302
R ₁₀	22 kΩ	IC6	CMOS 4066
R ₁₁	trimr 2 kΩ	IC7	ATMEGA328P-PU
R ₁₂	1 MΩ	IC8	MCP3202P
R ₁₅	trimr 1 kΩ	IC9	AD736JN
C ₁	1 μF svitkový	IC10	PCF8574AT
C ₂ , C ₃ , C ₄ , C ₅ , C ₉ , C ₁₀	10 μF/16 V elyt.	DIS	LCD 1602
C ₆ , C ₇ , C ₁₃ , C ₁₇ , C ₁₈ , C ₁₉	100 nF keram.	S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄	mikrospínač 6 x 6 mm
C ₈	10 nF keram.		
C ₉ , C ₁₂	10 μF/16 V elyt.		
C ₁₀	100 μF/16 V elyt.		
C ₁₁	47 μF/16 V elyt.		
C ₁₄	22 μF/16 V elyt.		
C ₁₅ , C ₁₆	22 pF keram.		

Seznam příloh

Příloha na CD:

zadani.jpg	zadání diplomové práce
práce.pdf	text diplomové práce
magnetometr.png	schéma zapojení
magnetometr.sch	schéma zapojení (soubor pro Eagle)
magnetometr.ino	zdrojový kód mikrořadiče (soubor pro Arduino IDE)
graf.png	graf linearity Hallovy sondy
výrobek.jpg	fotografie navrženého zařízení